

Identifizierung und Charakterisierung natürlicher Rohstoffe als Bodenverbesserungsmittel sandiger Substrate

- Untersuchungen mit Schafwolle und Biertreber an Mais und Weizen -

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum agriculturalarum

(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der
Lebenswissenschaftlichen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin
von Dipl. Geoökologin Kathleen Garz

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät: Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter/in: 1. Prof. Dr. Jutta Zeitz

2. Dr. Gernot Verch

3. Prof. Dr. Oswald Blumenstein

Datum der Einreichung: 20.04.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2017

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, natürliche Rohstoffe als potentielle Bodenverbesserungsmittel zu identifizieren und zu charakterisieren. Es sollte deren Eignung überprüft werden, ein sandiges Substrat in seinen chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften messbar zu beeinflussen. Anhand von Versuchsreihen im Gewächshaus und im Freiland ist die differenzierte Wirkung der Rohstoffe auf die C₄-Pflanze Mais und die C₃-Pflanze Weizen getestet worden.

Im Vorfeld der Untersuchungsreihen ist eine ausführliche Standortcharakterisierung der Freilandversuchsfläche in Berlin Dahlem durchgeführt worden. Zum einen wurden auf dieser Fläche die Freilandversuche durchgeführt und zum anderen ist hier das sandige Substrat aus dem Oberboden entnommen worden, welches anschließend in allen Versuchen als Grundsubstrat genutzt wurde. Im Rahmen dieser Arbeit sind die durchgeführten Untersuchungen in drei Themenkomplexe untergliedert worden, denen jeweils unterschiedliche Fragestellungen zugrunde liegen. Themenkomplex 1 beschäftigt sich insbesondere mit der Identifizierung und den grundlegenden physikalischen sowie chemischen Eigenschaften der natürlichen Rohstoffe. Im zweiten Themenkomplex werden die Ergebnisse von Pflanzversuchen mit Mais und Weizen im Gewächshaus dargestellt, in denen die Wirkung der Rohstoffe auf pflanzenbauliche, bodenchemische und bodenphysikalische Parameter ermittelt wurde. In Themenkomplex 3 sind Freilandversuche mit Weizen durchgeführt worden. Hier war es das Ziel, die Ergebnisse aus den vorhergehenden Themenkomplexen zu verifizieren und Aussagen zur langfristigen Wirkung der Rohstoffe auf die genannten Parameter zu treffen. Weiterhin wurde deren Wirkung auf das Bodenleben untersucht.

Aufgrund einer ausführlichen Literaturrecherche sind folgende Rohstoffe bzw. hieraus aufbereitete Produkte in eine erste Betrachtung einbezogen worden: Rohwolle vom Schaf und Schafwollpellets, Biertreber, Wasserpflanzen aus der Müggelspree, Hornkraut und die Braunalgen *Lessonia trabeculata* bzw. *Lessonia nigrescens* sowie Alginat. Diese Stoffe wurden in einem Pflanzversuch mit Koriander im Gewächshaus auf ihre wachstumsfördernde bzw. –hemmende Wirkung untersucht. Lediglich Rohwolle, Schafwollpellets und Biertreber hatten einen positiven Einfluss auf Wachstum und Entwicklung der Versuchspflanzen. Für diese Rohstoffe sind grundlegende Charakterisierungen vorgenommen worden. Es zeigte sich für Biertreber, dass dieser bei vollständiger Minerali-

sierung große Mengen an Stickstoff ($N_t=3,95\%$; $C/N=12,74$) bereitstellen kann. Zudem enthält er vergleichsweise viel Phosphor und Magnesium ($8,68 \text{ g kg}^{-1}$ und $4,05 \text{ g kg}^{-1}$) aber nur geringe Mengen an Kalium ($1,40 \text{ g kg}^{-1}$). Weiterhin lässt sich bei Aufwandmengen von 0,5 M.-% zunächst eine Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des sandigen Substrates feststellen, welche aufgrund der schnellen Mineralisierung aber nicht dauerhaft ist. Einzig die ligninhaltigen Bestandteile werden nur langsam zersetzt. Demnach haben Biertreber nur kurzfristige Effekte auf bodenchemische und –physikalische Parameter. Diese wirken sich dennoch messbar auf die erhobenen pflanzenbaulichen Parameter an den Versuchspflanzen Koriander, Mais und Weizen in allen durchgeführten Versuchsreihen aus. Rohwolle weist im Vergleich zu Biertreber mit $N_t=13,56\%$ noch höhere Mengen an Stickstoff auf. Weiterhin lassen sich mit $35,41 \text{ g kg}^{-1}$ höhere Mengen an Kalium aber mit nur $0,23 \text{ g kg}^{-1}$ bzw. $0,34 \text{ g kg}^{-1}$ geringere Mengen an Magnesium und Phosphor feststellen. Die Mineralisierung der Rohwolle erfolgt im Vergleich zu Biertreber langsam, sodass die enthaltenen Nährstoffe nur langsam pflanzenverfügbar werden, was anhand der ermittelten pflanzenbaulichen und bodenchemischen Parameter auch nachgewiesen werden konnte. Im Gegensatz zu Biertreber weist Rohwolle zunächst einen stark hydrophoben Charakter auf. Mit zunehmendem Abbau des Wollfettes (Lanolin) trägt aber auch Rohwolle bei Aufwandmengen von 0,1 M.-% zu einer messbaren Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit des sandigen Substrates bei. Zudem ist durch Zugabe der Rohwolle in ein sandiges Substrat eine Erhöhung der Bodenatmungsraten registriert worden. Höhere Aufwandmengen von 0,2 M.-% Rohwolle führen bei den ermittelten Parametern allerdings zu schlechteren Ergebnissen als Aufwandmengen von 0,1 M.-%. Vermutlich lassen zu hohe Aufwandmengen eine homogene Einmischung in den Boden nicht zu, sodass insbesondere die Zersetzungsprozesse deutlich langsamer ablaufen und demnach weniger Nährstoffe freigesetzt werden und auch die Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit aufgrund des Wollfetts geringer ist. Eine industrielle Verarbeitung der Rohwolle zu Schafwollpellets führt hingegen zu einer Verbesserung der Eigenschaften. Pflanzenverfügbare Nährstoffe stehen im Vergleich zu reiner Rohwolle schneller zur Verfügung. Durch ähnlich langsame Mineralisierungsraten wie bei der Rohwolle werden auch durch Schafwollpellets langfristig Nährstoffe freigesetzt und die Beeinflussung der bodenphysikalischen Parameter ist über längere Zeiträume nachweisbar. Allerdings müssen Aufwandmengen von 0,5 M.-% erbracht werden, um messbare Effekte insbesondere an den pflanzenbaulichen Parametern zu erkennen.

Mais reagiert insgesamt stärker auf die Zugabe der Rohstoffe als Weizen. In Abhängigkeit der Stickstoffgehalte bildet Mais unterschiedlich hohe Biomassen aus, was insbesondere bei geringen Kaliumgehalten trotz der höheren Wassernutzungseffizienz unter Wassermangelbedingungen im Vergleich zum Weizen das Risiko von Ertragseinbußen erhöht.

Im Ergebnis aller durchgeführten Untersuchungen ist festgestellt worden, dass die Rohstoffe Birtreber, Rohwolle und Schafwollpellets eine positive Wirkung auf die bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Parameter eines sandigen Ausgangssubstrats haben. Diese Verbesserung der Bodeneigenschaften führt zu höheren und qualitativ besseren Erträgen bei Mais und Weizen. Daher können die genannten Rohstoffe als Bodenverbesserungsmittel bezeichnet werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIV
1. EINLEITUNG	1
2. STAND DES WISSENS	3
3. FRAGESTELLUNG	11
4. STANDORTBESCHREIBUNG	15
5. THEMENKOMPLEX 1: VORVERSUCHE	22
5.1 Auswahl der Rohstoffe	22
5.2 Wachstumsversuche mit Koriander	23
5.2.1 Einleitung	23
5.2.2 Material und Methoden	23
5.2.3 Versuchsaufbau.....	24
5.2.4 Bonitur.....	25
5.2.5 Ernte	26
5.2.6 Ergebnisse und Diskussion.....	26
5.3 Chemische Charakterisierung	30
5.4 Physikalische Charakterisierung	32
5.4.1 Streubeutelversuche	32

5.4.2	REM-Aufnahmen	34
5.4.3	Hydrophobizität der Rohstoffe	37
5.4.4	Quellversuche	38
5.4.5	Wasserretention	39
5.5	Zwischenfazit Themenkomplex 1 (Vorversuche)	46
6.	THEMENKOMPLEX 2: GEWÄCHSHAUSVERSUCHE	48
6.1	Einleitung	48
6.2	Material und Methoden	48
6.2.1	Versuchsaufbau	49
6.2.2	Bonitur	51
6.2.3	Turgor und Bodenfeuchte	51
6.2.4	Ernte und Ernteaufbereitung	53
6.2.5	Statistische Auswertung mit R (3.2.2)	55
6.3	Ergebnisse und Diskussion	56
6.3.1	Versuchsreihe 1 (Mais 2014)	56
6.3.2	Versuchsreihe 2 (Sommerweizen 2014)	66
6.3.3	Versuchsreihe 3 (Mais 2015)	72
6.4	Zwischenfazit Themenkomplex 2 (Gewächshausversuche)	79
7.	THEMENKOMPLEX 3: FREILANDVERSUCHE	82
7.1	Einleitung	82
7.2	Material und Methoden	83

7.2.1	Versuchsaufbau.....	84
7.2.2	Bonitur.....	85
7.2.3	Ernte und Ernteaufbereitung	86
7.2.4	Bodenproben	87
7.2.5	Statistische Bewertung der Ergebnisse (Clusteranalyse)	89
7.3	Ergebnisse und Diskussion.....	90
7.3.1	Sommerweizen (2014)	90
7.3.2	Winterweizen (2014/2015).....	102
7.4	Zwischenfazit Themenkomplex 3 (Freilandversuche).....	108
8.	FAZIT UND AUSBLICK.....	111
9.	LITERATUR	118
	ANHANG	129
	DANKSAGUNG.....	162
	ERKLÄRUNG	163

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schematischer Aufbau der Themenkomplexe und deren inhaltliche Schwerpunkte	12
Abb. 2:	Freilandversuchsfläche (FU 7/8) am Standort der HU zu Berlin Dahlem (Google Earth, Stand: 2012)	15
Abb. 3:	Monatlicher Niederschlag und Monatsmitteltemperatur in den Versuchsjahren 2014 und 2015 sowie im langjährigen Mittel (1981-2010) am Standort Dahlem.....	16
Abb. 4:	Bodenprofil (52°27'59.39" N und 13°18'05.18" S) der Versuchsfläche (FU 7/8) Foto: K. Garz (08.04.2014)	17
Abb. 5:	Abbildungen der unteren Horizontkanten [m u. GOK] der Versuchsfläche (FU 7/8) am Standort Dahlem (a=Ap-Horizont; b=Bv-Ael-Horizont; c= Ael+Bt-Horizont); n= 240	18
Abb. 6:	Vertikale Differenzierung der Korngrößenfraktionen (n= 5), der Trockenrohdichte (n= 5) und des Penetrationswiderstandes (n= 300)	20
Abb. 7:	Mittelwert und Standardabweichung der Anzahl der Korianderpflanzen je Variante bei der Ernte (n=4)	27
Abb. 8:	Fotos zum Zeitpunkt der Ernte der Korianderpflanzen (K. Garz: 15.04.2014 bzw. 08.09.2014) von je einem Pflanzcontainer ausgewählter Varianten	28
Abb. 9:	Mittelwert und Standardabweichung der SPAD-Werte der Korianderpflanzen je Variante bei der Ernte (n=40).....	29
Abb. 10:	Mittelwert und Standardabweichung der Trockenmassen der Korianderpflanzen je Variante (n=4)	29
Abb. 11:	Zustand der Zersetzung der einzelnen Rohstoffe am 03.08.2015, Foto: K. Garz 03.08.2015	34

Abb. 12: REM-Aufnahmen der Rohstoffe in unterschiedlichen Zersetzungsstufen (Links= frisches Material, Mitte= frisches Material unmittelbar nach Einbringung, Rechts= zersetztes Material nach 9 Monaten im Boden)	36
Abb. 13: Volumenänderung über die Zeit von Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber	39
Abb. 14: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 0,1 M.-%; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte	43
Abb. 15: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 0,5 M.-%; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte	44
Abb. 16: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 1,0 M.-%; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte	44
Abb. 17: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 2 nach 32 Tagen im Substrat mit Konzentrationen von 0,5 M.-% Schafwollpellets und Biertreber sowie 0,1 M.-% Rohwolle; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte	45
Abb. 18: Exemplarische Fotos des Versuchsaufbaus (VR1 und 2) (K. Garz 25.06.2014)	50
Abb. 19: Messprinzip des Yara Water-Sensors mit einer schematischen Darstellung der Datenausgabe	52
Abb. 20: VR 1 Summe des Wasserverbrauchs der einzelnen Versuchsvarianten mit Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen); n=6.....	58
Abb. 21: VR 1 Mais Entwicklungsstand nach BBCH-Codierung nach Induzierung Wassermangelbedingungen (=trocken); n=6	58
Abb. 22: VR 1 Boxplots der Bodenfeuchte [Vol.-%] der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,05$	61
Abb. 23: VR 1 Boxplots der normalisierten Turgorwerte [%] (invers) der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,05$	61

Abb. 24: VR 1 Scatterplots der Kontrollvarianten der MLR.....	62
Abb. 25: VR 1 Mittlere Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte Stroh (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6).....	64
Abb. 26: VR 1 Mittlere Tausendkorngewichte (TKG) und mittlere Anzahl der Körner (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6).....	65
Abb. 27: VR 1 Rohproteinanteil (% TS) der behandelten Varianten (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=2)	66
Abb. 28: VR 2 Summe des Wasserverbrauchs der einzelnen Versuchsvarianten vom Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6).....	67
Abb. 29: VR 2 Mittleres Längenwachstum der einzelnen Versuchsvarianten mit Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)	68
Abb. 30: VR 2 Mittlerer Chlorophyllgehalt Sommerweizen nach Beginn der Wassermangelbedingungen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=150).....	70
Abb. 31: VR 2 Mittlere Frischmasse (FM) Stroh Sommerweizen 2014 (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)	71
Abb. 32: VR 2 Mittlere Frischmasse (FM) Ähren Sommerweizen 2014 (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)	72
Abb. 33: VR 3 Längenwachstum Mais 2015 ab 15.06.2015 (b=bewässert, t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5).....	74
Abb. 34: VR 3 Boxplots der Bodenfeuchte [Vol.-%] der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha = 0,1$	75
Abb. 35: VR 3 Boxplots der normalisierten Turgorwerte [%] (invers) der einzelnen Versuchsvarianten (b= bewässert; t= trocken= Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha = 0,05$	76

Abb. 36: VR 3 Mittlere Trockenmasse (TM) Stroh Mais 2015 (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)	78
Abb. 37: Parzellengenaue Ausbringung der Rohstoffe (Foto: K. Garz 28.03.2014).....	85
Abb. 38: VP 1 Mittleres Längenwachstum Sommerweizen 2014; n= 40	91
Abb. 39: VP 1 Mittlerer Chlorophyllgehalt Sommerweizen 2014; n= 40.....	91
Abb. 40: VP 1 Qualitative und quantitative Ertragsparameter Sommerweizen 2014;n=4.....	93
Abb. 41: Tiefenprofil C/N-Verhältnis vor Einarbeitung der Rohstoffe Frühjahr 2014; n= 8	95
Abb. 42: Tiefenprofil C/N-Verhältnis nach der Ernte Sommerweizen (VP 1) Sommer 2014; n= 8	95
Abb. 43: VP 1 gefittete Wasserspannungskurven (f) und Originalwerte Freiland Sommerweizen nach Ernte in 10 cm bis 20 cm Tiefe; n= 20	97
Abb. 44: VP 1 gefittete Wasserspannungskurven (f) und Originalwerte Freiland Sommerweizen nach Ernte in 20 cm bis 30 cm Tiefe; n= 20	97
Abb. 45: VP 1 Bodenatmungsraten der jeweiligen Varianten und Tiefen Sommerweizen; n= 20; $\alpha = 0,05$	100
Abb. 46: VP 1 Dendrogramm der Ernteparameter Sommerweizen	101
Abb. 47: VP 1 Dendrogramm der bodenphysikalischen Parameter und der Bodenatmung Sommerweizen	102
Abb. 48: VP 2 Mittleres Längenwachstum Freiland Winterweizen; n= 40.....	103
Abb. 49: VP 2 Mittlere Chlorophyllgehalte Freiland Winterweizen; n= 40.....	104
Abb. 50: VP 2 Qualitative und quantitative Ertragsparameter Winterweizen 2015; n= 4....	105
Abb. 51: VP 2 Boxplots der Bodenatmungsraten Freiland Winterweizen 2015; n= 5	106
Abb. 52: VP 2 Dendrogramm der bodenchemischen Parameter Winterweizen.....	107

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bodenchemische Kennwerte der Versuchsfläche FU 7/8 am Standort Dahlem für 2014; (n=2).....	21
Tab. 2:	Übersicht der Versuchsreihen zu den Wachstumsversuchen mit Koriander.....	23
Tab. 3:	Mengenangaben der jeweiligen Mischungsverhältnisse von Ausgangssubstrat und Rohstoffen in den Vorversuchen.....	25
Tab. 4:	Chemische Charakterisierung der für die weiteren Versuche ausgewählten Rohstoffe (n=2).....	31
Tab. 5:	Ergebnisse der Streubeutelversuche	34
Tab. 6:	Stichprobenumfang der einzelnen Versuchsreihen zur Bestimmung der Wasserretention nach zwei Tagen und nach 32 Tagen.....	40
Tab. 7:	Kennwerte zur Wasserretention Versuchsreihe 1 (Messung 2 Tage nach Versuchsansatz).....	41
Tab. 8:	Kennwerte zur Wasserretention Versuchsreihe 2 (Messung 32 Tage nach Versuchsansatz).....	42
Tab. 9:	Versuchsreihen der Gewächshausversuche mit den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten	49
Tab. 10:	Mengen der jeweiligen Rohstoffe für die Gewächshausversuche pro Gefäß.....	50
Tab. 11:	Anzahl der eingesetzten Yara ZIM-Sensoren in den Versuchsreihen	52
Tab. 12:	Tag der Ernte und durchschnittliches BBCH-Stadium der geernteten Pflanzen je Versuchsreihe	53
Tab. 13:	Auflistung der in den Versuchsreihen (VR) erhobenen Ernteparameter der oberirdischen Biomasse	54

Tab. 14:	VR 1 Ergebnis der Diskriminanzanalyse mit den Eingangsparametern normalisierter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen)	63
Tab. 15:	VR 2 Entwicklungsstadien (Median) Sommerweizen nach Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6)	68
Tab. 16:	VR 3 Mittlere BBCH-Stadien der einzelnen Versuchsvarianten nach Induzierung der Wassermangelbedingungen (b=bewässert, t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=5)	73
Tab. 17:	VR 3 Mais 2015 Ergebnisse der MLR der unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Varianten (t= trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)	77
Tab. 18:	VR 3 Ergebnis der Diskriminanzanalyse mit den Eingangsparametern normalisierter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5).....	77
Tab. 19:	Vegetationsperioden (VP) Freilandversuche mit den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten	83
Tab. 20:	Versuchsvarianten (Faktoren) Freilandversuche mit Parzellennummern	84
Tab. 21:	Analysierte Parameter in Stroh und Korn Freilandversuche	87
Tab. 22:	Am Bodensubstrat erhobene Parameter in den Vegetationsperioden nach der Ernte.....	88
Tab. 23:	VP 1 Chemische Analysen Korn SW 2014; n= 4	94
Tab. 24:	VP 1 Chemische Analysen Boden SW 2014; n= 4.....	94
Tab. 25:	Nährstoffeintrag in den Boden bei angenommener vollständiger Minera- lisierung der Rohstoffe und beispielhaftem Nährstoffentzug durch Weizen	96
Tab. 26:	Kennwerte der Wasserretention Freiland Sommerweizen (VP 1) nach Ernte; n=20	98

Abkürzungsverzeichnis

AH	Luftfeuchtigkeit (Air humidity)
Ap	gepflügter Oberbodenhorizont
AT	Lufttemperatur (Air temperature)
b	bewässert
BBCH	Entwicklungsstadien der Biologischen Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
Bt	Unterbodenhorizont mit Ton angereichert
Bv-Ael	durch Lessivierung geprägter, verbraunter Oberbodenhorizont
D	Dünger
DL	Doppellactat
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
FP	Feinporen
GePV	Gesamtporenvolumen
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GOK	Geländeoberkante
GP	Grobporen
Hornk.	Hornkraut
LF	Leitfähigkeit
LK	Luftkapazität
L.N.	<i>Lessonia nigrescens</i>
IS	lehmiger Sand (Bodenschätzung)
L.T.	<i>Lessonia trabeculata</i>
M.-%	Masseprozent
ME	Metabolische Energie
MLR	multiple lineare Regressionsanalyse
MP	Mittelporen
MPa	Megapascal
MW oder \bar{x}	arithmetischer Mittelwert
n	Gesamtstichprobenumfang
NN	Normalnull
nFK	nutzbare Feldkapazität
P	Schafwollpellets

pF	dekadischer Logarithmus des Matrixpotentials
PWP	Permanenter Welkepunkt
r	Korrelationskoeffizient
rAp	reliktischer Pflughorizont
REM	Rasterelektronenmikroskop
RETC	Retention Curve Program
Rp	Rohprotein
SD oder σ	Standardabweichung
SM	Bodenfeuchte
Sl2	schwach lehmiger Sand
SW	Sommerweizen
t	trocken
T	Biertreber
TK	Transpirationskoeffizient
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Trockenmasse
TME	Trockenmasseertrag
TN	normalisierter Turgorwert
TOC	Total Organic Carbon
TRD	Trockenrohdichte
TS	Trockensubstanz
Vol.-%	Volumenprozent
VP	Vegetationsperiode
VR	Versuchsreihe
W	Rohwolle vom Schaf
WNE	Wassernutzungseffizienz
Wp	Wasserpflanzen
Wv	Wasserverbrauch
WW	Winterweizen

1. Einleitung

Durch die zunehmende Veränderung des Klimas kommt es zu immer länger andauernden Trockenperioden (EITZINGER et al., 2009). In Regionen wie Brandenburg, die hauptsächlich durch sandige Böden geprägt sind, wird die Landwirtschaft dadurch vor eine immer größere Herausforderung gestellt (CHMIELEWSKI, 2009). So besitzen sandige Böden nur eine geringe Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit (HARTGE et al., 2014). Das Bestreben, den Boden in seinen Eigenschaften zu verbessern, ist so alt wie die Landwirtschaft selbst (FINCK, 2007). Erreicht werden kann das durch die Zugabe von Bodenverbesserungsmitteln. Diese sollen per Definition durch Einbringung in den Boden dessen physikalische und biologische Beschaffenheit verbessern, ohne nachteilige Auswirkungen zu besitzen (EG, 1998).

Ein Ansatz ist die Verwertung von Biomassereststoffen in Form von Biokohle, deren Einsatz in den letzten zehn Jahren sehr forciert worden ist. Hierbei handelt es sich allerdings um ein Produkt, dessen Eigenschaften hauptsächlich vom Herstellungsverfahren bestimmt werden. Faktoren wie die verwendeten Ausgangsstoffe, die Prozesstemperatur sowie die Wasser- und Sauerstoffzufuhr sind entscheidend. Demnach handelt es sich um einen hochkomplexen, energieaufwändigen und mit Kosten verbundenen Prozess (TEICHMANN, 2014). Auch können Langzeitwirkungen einmal in den Boden gebrachter Biokohlen durch deren lange Persistenz nur schwierig abgeschätzt werden (KUZYAKOV et al., 2014). Die Identifizierung und Charakterisierung natürlicher und nachhaltiger Stoffe zur Bodenverbesserung ist daher von besonderem Interesse. Vor allem die Verbesserung der physikalischen, chemischen und biologischen Beschaffenheit der Böden in Bezug auf ertragssteigernde Effekte an unterschiedlichen Pflanzkulturen ist relevant.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die potentielle Eignung unterschiedlicher natürlicher Rohstoffe zu geben, die bei Einbringung in einen sandigen Boden zur Verbesserung seiner bodenchemischen und –physikalischen Eigenschaften führen. Anhand mehrerer Versuchsreihen im Gewächshaus und Freiland soll die differenzierte Wirkung dieser Stoffe auf C₄-Pflanzen wie Mais und C₃-Pflanzen wie Weizen überprüft werden.

Im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) wurde es ermöglicht, geeignete Stoffe auszuwählen und zu untersuchen. Die Arbeiten sind in Kooperation mit der Yara – ZIM Plant Technology GmbH durchgeführt worden. Inhaltliches Ziel des Koopera-

tionspartners war die Entwicklung eines multifunktionellen Sensorsystems für die Echtzeiterfassung des Wasserbedarfs von Kulturpflanzen und nachhaltiger Bodenmanagementbedingungen. Innerhalb der Projektlaufzeit vom 01.10.2013 bis zum 30.09.2015 mussten aus Gründen der Kooperation und finanziellen Förderung alle Versuchsreihen und Untersuchungen durchgeführt worden sein.

Während der Projektlaufzeit wurden folgende Rohstoffe oder aus ihnen hergestellte Produkte auf ihre Eignung untersucht, die bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Parameter zu beeinflussen: Braunalgenarten (*Lessonia nigrescens* und *Lessonia trabeculata*), Alginat, Hornkraut, Wasserpflanzen, Rohwolle vom Schaf, Schafwollpellets und Biertreber. Bereits anhand der Literaturrecherche wurde deutlich, dass Rohwolle und Biertreber das größte Potential aufweisen. Für Biertreber ist durch MBWAGU (1989 und 1990) eine Beeinflussung der Nährstoffgehalte und der bodenphysikalischen Parameter durch dessen Einbringung in ein sandiges Substrat untersucht worden. Es konnte eine positive Beeinflussung auf Längenwachstum und Ertrag bei Mais nachgewiesen werden. Auch für Rohwolle vom Schaf ist durch eine Vielzahl an Untersuchungen nachgewiesen worden, dass diese durch Einarbeitung in den Boden zu einer besseren Nährstoffverfügbarkeit, einer höheren Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und infolgedessen zu einem verbesserten Pflanzenwachstum führt (TIWARI et al. 1989; ZHELJAZKOV, 2005 und ZHELJAZKOV et al., 2009; GÓRECKI und GÓRECKI, 2010; SURUCHI et al., 2014).

Ausgehend von der Zielstellung ergeben sich folgende grundlegende Fragestellungen:

1. *Lassen sich die untersuchten Rohstoffe anhand der in der Zielstellung genannten Parameter im Sinne der Europäischen Gemeinschaft (98/488/EG) Artikel 1 als Bodenverbesserungsmittel bezeichnen?*
2. *Ist eine industrielle Aufbereitung der Rohstoffe notwendig, um die in der Zielstellung genannten Parameter zu beeinflussen?*
3. *Sollen die Rohstoffe eher für die Bodenverbesserung in Bezug auf den Anbau von C₄-Pflanzen wie Mais oder für C₃-Pflanzen wie Weizen genutzt werden?*

Im Verlauf der Arbeit werden die grundlegenden Fragestellungen durch ergänzende Teilfragen präzisiert und diese anhand der einzelnen Themenkomplexe im Detail durch ein jeweils abschließendes Zwischenfazit beantwortet.

2. Stand des Wissens

Die Bewirtschaftung sandiger Böden stellt die Landwirtschaft vor große Herausforderungen. Aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften besitzen solche Böden nur eine geringe Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit (HARTGE et al., 2014; SCHEFFER et al., 2013; UZOMA et al., 2011). Durch die zunehmenden Trocken- und Hitzeperioden in den letzten Jahren sowie den prognostizierten Klimawandel ist diese Problematik von immer größerer Bedeutung (EITZINGER et al., 2009; HILLEL und ROSENZWEIG, 2011). Hitzewellen, wie im Jahr 2003 registriert, mit einhergehenden Effekten wie erhöhten Verdunstungsraten in Folge von geringeren Sommerniederschlägen und höheren Temperaturen, stellen zukünftig eine zunehmende Herausforderung für die landwirtschaftliche Produktion dar (CHMIELEWSKI, 2009). Regionen wie beispielsweise Brandenburg sind aufgrund ihrer landschaftlichen Genese und geografischen Lage, durch sandige Standorte, ein subkontinentales Übergangsklima mit nur geringen Niederschlagssummen zwischen 480 und 670 mm pro Jahr sowie geringen Ackerzahlen von im Mittel 33,8 im Vergleich mit anderen Regionen Deutschlands als benachteiligt zu bewerten. Demzufolge sind die zu erwartenden Auswirkungen der klimatischen Änderungen hier besonders gravierend. Aus ökonomischer und sozialer Sicht ist eine effektive landwirtschaftliche Nutzung dennoch von besonderer Bedeutung (LELF, 2000; MLUL, 2016). Eine nachhaltige Bewirtschaftung ihrer Nutzflächen ist im Denken und Handeln der Landwirte fest verankert (KNITTEL et al., 2003). Daher liegen die Forschungsschwerpunkte der Agrarwissenschaften in Folge der klimatischen Veränderungen zunehmend auf einer angepassten Fruchtfolge, angepassten Bodenbearbeitungstechnologien, Bewässerungstechniken sowie Modellen, welche die Möglichkeit bieten, sich auf die veränderten Bedingungen vor allem in Bezug auf die veränderte Wasserverfügbarkeit einzustellen. Ziel ist es, eine optimierte soziale, ökonomische und ökologische landwirtschaftliche Nutzung der Standorte im regionalen aber auch überregionalen Maßstab zu erreichen (GUTZLER et al., 2015; MÜNCH et al., 2014; NENDEL et al., 2014). Um die genannten Forschungsschwerpunkte gezielt umzusetzen, sind Kenntnisse bodenphysikalischer und –chemischer Prozesse, insbesondere in Bezug auf den Bodenwasserhaushalt und die Fähigkeit Nährstoffe zur Verfügung zu stellen, von grundlegender Bedeutung. Einhergehend mit dem Erkenntnisgewinn ergibt sich das Bestreben, die Bodenstruktur, insbesondere auf nährstoffarmen Standorten wie den sandigen Böden Brandenburgs, durch Zugabe von Bodenverbesserungsmitteln positiv zu beeinflussen.

Ansätze der Bodenverbesserung durch die Zugabe von beispielsweise Stallmist sind so alt wie die Historie des Ackerbaus selbst (FINCK, 2007). Erste wissenschaftliche Abhandlungen zum Thema lassen sich bis in das 19. Jh. zurückverfolgen (siehe z. B. BURKHARD, 1863). Auch heute noch ist Stallmist bzw. Gülle eine weit verbreitete Variante der Bodenverbesserung durch organische Düngung. In Folge der Rinder- und Schweinehaltung fallen in Deutschland jährlich Wirtschaftsdünger in Form von ca. 32 Mio t FM Festmist und ca. 111 Mio t FM Gülle an (SCHULTHEISS et al., 2012; 2010). Durch diese Düngevariante werden etwa 868 Tt N, was etwa der Hälfte der eingesetzten Stickstoffdünger entspricht, aufgebracht. Bei an die Pflanzkultur angepasster Anwendung können die genannten Wirtschaftsdünger die Mineraldünger ersetzen und für eine im Vergleich langfristige Erhöhung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs und Phosphors im Boden sorgen (FEDEROLF et al., 2016; KNITTEL et al., 2003; MENG et al., 2005). Im Vergleich zu reinen Mineraldüngern wirkt sich die Zugabe organischer Dünger vor allem im sandigen Substrat durch die Zuführung organischer Substanz stärker auf die mikrobielle Aktivität und die bodenphysikalischen Eigenschaften, wie die Wasserspeicherfähigkeit, Porosität, Infiltrabilität, hydraulische Leitfähigkeit sowie die Trockenrohdichte aus (HAYNES und NAIDU, 1998; SRADNICK et al., 2014). Allerdings können sowohl Gülle als auch Festmist den Einsatz weiterer Dünge- bzw. Bodenverbesserungsmittel nicht ersetzen, da diese nur sehr lokal in großen Mengen produziert werden und sowohl der Transport als auch die Lagerung mit hohem Aufwand erfolgen muss (MUCHOVEJ et al., 1997). Lagerung und Applikation in den Boden sind mit ökologischen Risiken verbunden. Da aufgrund regionaler Überproduktion häufig eine Überdüngung bzw. eine unsachgemäße Lagerung des Materials erfolgt, kommt es dort vermehrt zu Nährstoffeinträgen in Form von hauptsächlich Stickstoff und Phosphor über das Sickerwasser in das Grundwasser (CHANG and ENTZ, 1996; SCHULTHEISS et al., 2012; SIMS, 1997), wobei sandige Standorte hierbei besonders gefährdet sind (BECKWITH et al., 1998). Weiterhin werden aufgrund des vermehrten Einsatzes von Antibiotika in der Viehhaltung diese durch Festmist und Gülle in den Boden eingetragen und können ebenso wie Nährstoffe durch Auswaschungsprozesse in das Grundwasser gelangen und die Problematik der Antibiotikaresistenzen weiter verschärfen (HALLER et al., 2002; SOLLIEC et al., 2016). Zudem werden durch frisches Material Pathogene auf und in den Boden gebracht (MUCHOVEJ et al., 1997; PELL, 1997). Um die genannten Probleme zu minimieren, ist es ein Ansatz, aus der anfallenden Gülle und dem Festmist Biokohle herzustellen (UZOMA et al., 2011). Biokohle kann nicht nur aus Abfällen der Tierproduktion hergestellt werden, sondern aus jeglicher Biomasse. In Abhängigkeit des Ausgangsmaterials und des Herstellungsprozesses weist Biokohle differenzierte Eigenschaften auf (LEHMANN und JOSEPH, 2015; SOHI

et al., 2009). Allen gemeinsam ist, dass durch die Herstellung in Kombination mit der Einbringung in den Boden vor allem CO₂ fixiert wird. Da Biokohle im Vergleich zu anderen organischen Materialien wie beispielsweise Kompost im Boden lange stabil bleibt, werden hierdurch die Emissionen des klimaschädlichen Gases reduziert (LEHMANN and JOSEPH, 2015; SOHI et al., 2009; WOOLF et al., 2010). Die meisten Studien zum Thema Biokohle als Bodenverbesserungsmittel zeigen vor allem, dass es bei Einbringung in den Boden durch deren Struktur zu einer Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und des Wasserrückhaltevermögens des Bodens kommt, was sich letztlich positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt (ABEL et al., 2013; ALBURQUERQUE et al., 2013; LIU et al., 2012). Es gibt allerdings auch Studien, in denen die Ergebnisse eher negativ ausfallen. So kam es nach dem Einsatz von Biokohle zu verminderten Ernteerträgen (RAJKOVICH et al., 2012) oder einer verminderten Resistenz der Pflanzen gegenüber Krankheiten und Insekten (VIGER et al., 2015). Zudem ist eine an die Standortbedingungen angepasste Auswahl der Biokohle wichtig, da diese sich je nach Eigenschaften auch nachteilig beispielsweise auf die Mikroflora des Bodens auswirken kann (ZIMMERMAN et al., 2011). Bis vor wenigen Jahren wurde ein Großteil der bisher durchgeführten Studien zum Thema vor allem in tropischen Regionen und Böden durchgeführt (GURWICK et al., 2013). Aussagen über die Wirkung auf Kulturpflanzen auf sandigen Standorten unter klimabedingten zunehmenden Wassermangelbedingungen, wie in Brandenburg, beruhen daher nur auf vergleichsweise wenigen aber aktuellen Forschungen (z. B. ABEL et al., 2013; LIU et al., 2012; REIBE et al., 2015; UZOMA et al., 2011). Außerdem sind einmal eingebrachte Biokohlen je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsart über lange Zeiträume von bis zu mehreren tausend Jahren im Boden vorhanden (KUZYAKOV et al., 2014). Nicht zuletzt ist mit der Herstellung von Biokohle auch immer ein logistisch aufwändiger und kostenintensiver Prozess verbunden (SHACKLEY et al., 2011). Daher stellt sich die Frage nach Stoffen, welche insbesondere nachhaltige Aspekte erfüllen und die Nachteile der genannten Varianten der Bodenverbesserung (Festmist, Gülle, Mineraldünger und Biokohle) nicht aufweisen. Weiterhin müssen diese an klimatisch benachteiligten und durch sandige Böden gekennzeichneten Standorten wie Brandenburg positiv auf die bodenphysikalischen, -chemischen und biologischen Eigenschaften wirken und so messbar den Ertrag von Kulturpflanzen in Qualität und Quantität verbessern.

Die Verwertung von Biomassereststoffen ist bereits aus dem Prozess der Biokohleherstellung bekannt. Biertreber ist einer dieser Reststoffe (POERSCHMANN et al., 2014), welcher sich aufgrund der resultierenden Eigenschaften der Biokohle, sehr gut als Rohstoff hierfür eignet. Biertreber bestehen hauptsächlich aus Hemizellulosen, zudem zu 17% aus weiteren Zellulo-

sebestandteilen, zu 28% aus Polysacchariden sowie zu 28% aus Lignin und sind ein nährstoffreiches Abprodukt des Bierbrauprozesses. So sind in der Trockenmasse ca. 52% TOC, 4,3% N_t und 27% P_t enthalten. Weiterhin weisen Biertreber ein enges C/N-Verhältnis von ca. 12,1 auf und sind mit einem Feuchtegehalt von ca. 83% in der Lage, viel Wasser aufzunehmen (MATHIAS DOS SANTOS et al., 2014). Insgesamt sind weltweit etwa 30 Mio t TM pro Jahr und in Deutschland etwa 0,7 Mio t TM pro Jahr an Biertrebern verfügbar (SCHUCHARDT und VORLOP, 2010). Aufgrund des hohen Nährwertes von bis zu 11 MJ ME kg⁻¹ TM wird Biertreber vorwiegend in der Rinderfütterung als Energiefutter eingesetzt. In diesem Zusammenhang muss aber darauf geachtet werden, den Mastrindern nicht zu viel Biertreber zu füttern, da es sonst zu negativen Beeinflussungen in der Gewichtszunahme der Tiere kommen kann (BUCHGRABER und RESCH, 1997). Die Lagerung von frischem Biertreber ist kompliziert, da es insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen zu einer raschen Zunahme an Bakterien kommt, die sich negativ auf das Tierwohl auswirken können (WENZINGER, 2013). Um verdorbenen Biertreber nicht als Abfall entsorgen zu müssen, ist dieser aufgrund seiner Nährstoffgehalte und seiner Fähigkeit viel Wasser aufzunehmen, für die Nutzung als Bodenverbesserungsmittel geeignet. Nach aktuellem Kenntnisstand existieren bisher nur wenige Studien zum Thema Biertreber und seinem agronomischen Potential (MBAGWU, 1989; MBAGWU et al., 1990). In diesen Untersuchungen wurden sowohl die Nährstoffzufuhr als auch die Beeinflussung bodenphysikalischer Parameter untersucht. Bei den betrachteten Böden handelte es sich u.a. um einen tropischen Ultisol mit sandig lehmiger Textur aus Nigeria. Es konnte nachgewiesen werden, dass es durch die Zugabe von Biertrebern zu einer Zunahme der organischen Substanz, der Aggregatstabilität und der Wasserspeicherfähigkeit im Boden gekommen ist. Infolgedessen und der ebenfalls durch die Biertreber in den Boden eingebrachten Nährstoffe (Ca, Mg, K, N, P), wurden an der Versuchspflanze Mais ein erhöhtes Längenwachstum und höhere Trockenmasseerträge erzielt.

Bei der Viehhaltung können neben tierischen Ausscheidungen und nicht mehr verwendbaren Futtermitteln noch weitere Reststoffe entstehen, wie beispielsweise Schafwolle. Aufgrund des Preisverfalles war und ist es für Schafhalter in Deutschland kaum noch rentabel, die Wolle für textile Zwecke anzubieten. Auf Nachfrage beim Schafzuchtverband Berlin/Brandenburg liegen die momentanen Wollpreise für 2016 je nach Qualität bei 0,00 € kg⁻¹ bis 1,70 € kg⁻¹ (mündliche Auskunft von Frau Wohlfahrth am 29.07.2016). Demgegenüber stehen die Preise für die Schur, die je nach Region und Herdengröße zwischen 0,50 € und 10,00 € je Schaf liegen. Bei einem Wollertrag von drei bis fünf Kilogramm Wolle je Schaf, können durch den Wollverkauf kaum noch Gewinne erwirtschaftet werden. Da es sich um einen nachwachsen-

den Rohstoff mit vielfältigen Eigenschaften handelt, wurden in den letzten ca. 30 Jahren eine Reihe alternativer Verwertungsmöglichkeiten für Schafwolle erforscht. So existieren Ansätze, Schafwolle aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit als Dämmstoff zu nutzen. Allerdings birgt dieser Einsatzzweck den Nachteil, dass Dämmstoffe aus Schafwolle ebenso wie Textilien anfällig gegen Kleidermotten und Teppichkäfer sind (WIELAND und BOCKISCH, 2003). Zudem ist die Aufbereitung der Rohwolle als Dämmmaterial sehr aufwendig, da diese in der Regel zunächst gewaschen werden muss, um Fett und Verunreinigungen zu entfernen (KORJENIC et al., 2014). Ein weiterer Ansatz für die Verwertung der Schafwolle ist es, diese als Nährstoffquelle im Pflanzenbau einzusetzen. Es zeigte sich, dass Schafwolle vor allem eine gute Stickstoffquelle darstellt. Da gleichzeitig auch andere Nährstoffe wie Schwefel und Kalium vorhanden sind, könnte Schafwolle eine günstige Alternative zu herkömmlichen Düngern darstellen (SURUCHI et al., 2014; TIWARI et al., 1989; ZHELJAZKOV, 2005). Um die in der Schafwolle enthaltenen Nährstoffe pflanzenverfügbar zu machen, lassen sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze feststellen. So wird über den Prozess der alkalinen Hydrolyse das Wollprotein Keratin in seine Bestandteile aufgespalten. Keratin ist ein Strukturprotein und besteht hauptsächlich aus Aminosäuren und Schwefelverbindungen (ZOCCOLA et al., 2014). In der Regel werden der Wolle, je nach Verfahren, definierte Mengen an Chemikalien wie beispielsweise Kalium- und Natriumhydroxid zugesetzt und dann auf über 100 °C erhitzt. Durch Zugabe der Wollhydrosylate in den Boden konnte eine positive Beeinflussung des mikrobiellen Bodenlebens und des Wachstums der Versuchspflanzen festgestellt werden (NUSTOROVA et al., 2006). Weitere Ansätze bestehen darin, die Wolle vor deren Verwendung zu kompostieren und teilweise mit weiteren Materialien zu vermischen. Die Kompostierung hat den Vorteil, dass eventuell enthaltene Samen und Keime durch die hierbei über einen Zeitraum von mehreren Tagen entstehenden hohen Temperaturen von über 50 bis 60 °C zumindest teilweise vernichtet werden. Zudem ist die Beimengung weiterer Materialien wie Dung, gemahlenem Phosphatgestein oder Holzspänen besser möglich. Ziel dieser Beimengungen ist es, einen Kompost von sehr hoher Qualität in Bezug auf Nährstoffgehalte zu erzeugen (HUSTVEDT et al., 2016). Vor allem durch die verbesserten Nährstoffgehalte des Bodens nach Einbringung unterschiedlicher Kompostvarianten wurden im Vergleich zu nicht behandeltem Boden höhere Trockenmasseerträge von Stroh und Korn bei Versuchspflanzen wie Weizen erzielt (TIWARI et al., 1989). Um eine möglichst rasche Mineralisierung der Wolle im Boden zu erreichen, kann diese auch zunächst gewaschen werden. Dadurch werden die schwer zersetzbaren Wollfette von den Fasern entfernt (GÓRECKI and GÓRECKI, 2010). Alle diese Aufbereitungsprozesse sind durch einen hohen logistischen und zeitlichen Aufwand gekennzeichnet. Außerdem sind

Aufbereitungsprozesse häufig durch Nährstoffverluste der Ausgangsprodukte geprägt (ZHELJAZKOV, 2005), sodass in den letzten elf Jahren Untersuchungen zur Eignung von Rohwolle als Nährstoffquelle im Pflanzenbau durchgeführt wurden. Pionierarbeit auf diesem Gebiet hat ab dem Jahr 2005 ZHELJAZKOV geleistet. Es wurden hier erstmals Feld- und Containerversuche an unterschiedlichen Kräutern wie Salbei, Basilikum und Pfefferminze mit unbehandelter Rohwolle durchgeführt. In deren Ergebnissen zeigten sich in den mit Rohwolle behandelten Böden, im Vergleich zu den unbehandelten, höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ sowie Gesamtstickstoffgehalte. Die Pflanzen profitierten durch die Düngung mit Rohwolle nachweislich durch eine erhöhte Kolonisation der Wurzeln mit Mykorrhiza und höhere Proteingehalte im Blattgewebe. Zur Evaluierung dieser Ergebnisse wurde eine Folgeuntersuchung mit den Versuchspflanzen Mangold, und erneut Basilikum durchgeführt. Die Aufwandmengen von 20; 40; 80 und 120 g Rohwolle auf 6 kg Substrat entsprachen mit Ausnahme der 20 g Variante beim Mangold, denen der ersten Studie. Die Ergebnisse bezüglich der Erhöhung der Stickstoffgehalte durch den Einsatz von Rohwolle im Boden konnten bestätigt werden, und ebenso wie in der ersten Untersuchung erhöhte sich das Wachstum der Pflanzen. Zusätzlich wurden in dieser Folgeuntersuchung REM-Aufnahmen angefertigt, um die Zersetzung der Wollabfälle zu dokumentieren und damit Rückschlüsse auf den Prozess der Freisetzung der enthaltenen Nährstoffe zu ziehen. Im Ergebnis zeigte sich ein heterogenes Bild. Einige Wollfasern waren nach bestimmten Zeitspannen bereits zersetzt, andere in ihrer Struktur nahezu vollständig erhalten, so dass eine langfristige Nährstofffreisetzung angenommen worden ist. Als Ausgangssubstrate für die Untersuchungen wurden Torf und Perlite verwendet. Änderungen in deren physikalischen Eigenschaften wie der Trockenrohdichte, der Wasserhaltefähigkeit und der Porosität konnten im Vergleich zur Kontrolle nicht festgestellt werden (ZHELJAZKOV, 2005; ZHELJAZKOV et al., 2009). Ausgehend von diesen grundlegenden Forschungen wurden in den letzten Jahren weitere Untersuchungen mit dem Einsatz von Rohwolle und höheren Pflanzkulturen durchgeführt. Zudem wurde der Einsatz unterschiedlicher Aufwandmengen an Rohwolle dem Einsatz von herkömmlichem Stalldung gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigte sich, dass bereits 2 t ha^{-1} Rohwolle die gleiche Menge an Stickstoff in einen sandigen Boden eintragen wie 56 t ha^{-1} aufgebrachter Stalldung. Als Versuchspflanze diente hier Spargel, dessen Erträge in den mit Rohwolle gedüngten Varianten um 7 bis 19% höher waren als bei den Varianten, die mit Stalldung behandelt wurden. Ein weiteres Ergebnis dieser Untersuchung ist die Vermutung, dass eine zu hohe Aufwandmenge an Rohwolle zu verminderten Erträgen führen könnte (VONCINA, 2013). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch SURUCHI et. al 2014. Auch hier wurden bei geringeren Aufwandmengen von 40 g Rohwolle auf 6 kg sandi-

ges Substrat bei der Versuchspflanze Guarbohne höhere Erträge erzielt. Zusammenfassend zeigen alle bisher betrachteten Studien, dass Rohwolle ein sehr guter Lieferant an unterschiedlichen Nährstoffen (C, N, Ca, Mg, K, Na, Fe, Cu, Mn, Zn, P und S) ist und diese nach Einarbeitung der Rohwolle in die Substrate auch pflanzenverfügbar sind, sodass Rohwolle teilweise als Ersatz bzw. Ergänzung zu herkömmlichen Düngern angesehen wird (GÓRECKI and GÓRECKI, 2010; SURUCHI et al., 2014; VONCINA, 2013; ZHELJAZKOV et al., 2009). Weiterhin scheint Rohwolle sich positiv auf den Bodenwasserhaushalt auszuwirken, da diese bis zu 30% ihres Eigengewichtes an Wasser aufnehmen kann. Je nachdem in welcher Form diese eingebracht wird (Abrieb, Matte, Filz), wird die Bodenfeuchte im Vergleich zu einer nicht behandelten Kontrollgruppe auf höherem Niveau gehalten, was sich vor allem in trockenen Regionen positiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt (KADAM et al., 2014). Das Institut für Agrarökologische Aspekte (IASP) Berlin hat ausgehend von den genannten Eigenschaften ein vermarktungsfähiges Produkt entwickelt. Hierzu wurde die Rohwolle in Pellets gepresst. Diese werden derzeit durch einen Onlinehandel vertrieben (FLORAPELL, 2016). Ansatz war es, ein Produkt zu entwickeln, welches vor allem als multifunktionaler Dünger wirken soll. Je nach Produktionscharge liegen die pH-Werte zwischen 7,5 bis 9 und die Gesamtstickstoffgehalte bei ca. 10,5%. Die Pellets sind in der Lage, innerhalb von 15 Minuten das 20-fache ihres Gewichtes an Wasser aufzunehmen. Untersuchungen zeigten, dass bei in einem Feldversuch angebautem Gemüse, Mehrerträge von 20% im Vergleich zu Mineraldüngern erreicht wurden (BÖHME et al., 2010). Die empfohlenen Aufwandmengen liegen in Abhängigkeit der Kultur zwischen 10 g und 50 g je Pflanze (FLORAPELL, 2016).

Bisherige Studien zu den Themen Biertreber und Schafwolle als Bodenverbesserungsmittel setzen sich demnach mit deren grundlegenden Eigenschaften und dabei insbesondere mit den Nährstoffgehalten auseinander. Bei den hierbei betrachteten Versuchspflanzen handelt es sich häufig um Kräuter- oder Gemüsesorten. Landwirtschaftliche Kulturen wie Mais oder Weizen wurden hingegen kaum betrachtet. Diese gewinnen allerdings in Regionen wie Brandenburg trotz der schwierigen Anbaubedingungen, die aufgrund der zunehmenden Niederschlagsarmut und der leichten Böden vorhanden sind, eine immer größere Bedeutung. So vergrößerten sich die Maisanbauflächen in den letzten Jahren kontinuierlich und lagen 2015 bei 537.900 ha. Das entspricht ca. 53% der gesamten Ackerflächen Brandenburgs. Winterweizen wurde 2015 auf 165.800 ha angebaut, was ca. 16% der Flächen entspricht (ASBB, 2015). Mais als C₄-Pflanze und Weizen als C₃-Pflanze stellen deutlich unterschiedliche Ansprüche an ihren Standort. Diese sind bei Mais vergleichsweise gering. Einzig kalte und staunasse Böden bzw. Moorböden sind weniger für den Anbau geeignet. Zur Keimung ist eine Bodentemperatur von

mindestens 8 °C notwendig, Frost hingegen wird nicht vertragen (DIEPENBROCK et al., 2005). Der Stickstoffbedarf liegt abhängig vom Boden, der Sorte und vom angestrebten Ertrag bei 180 kg N ha⁻¹ bis 200 kg N ha⁻¹. Auf sandigen Böden mit einer hohen Auswaschungsgefahr wird bei der Düngung mit Gülle eine mehrmalige zeitlich versetzte Aufbringung empfohlen. Der Wasserbedarf liegt je nach Ertragserwartung, Sorte und Standort bei 350 mm bis 700 mm (EHLERS, 2013; LIEBEREI et al., 2007; LWK NRW, 2016; RATH, 2016). Mais weist als C₄-Pflanze eine hohe Wassernutzungseffizienz (WNE in kg ha⁻¹ mm⁻¹) auf. Berechnet wird diese durch das Verhältnis zwischen Trockenmasseertrag (TME in kg ha⁻¹) und Wasserverbrauch (WV in mm). Je nach Pflanzengattung nimmt die WNE mit zunehmendem Sättigungsdefizit der Luft ab. Bei C₃-Pflanzen ist dies deutlich schneller der Fall als bei C₄-Pflanzen (CHMIELEWSKI, 2011; SCHITTENHELM, 2009). Weizen, insbesondere Winterweizen, hat im Gegensatz zu Mais sehr hohe Ansprüche an den Standort. Diese beziehen sich vor allem auf einen ausgeglichenen Wasser- und Lufthaushalt sowie ein hohes Nährstoffnachlieferungsvermögen des Bodens. Der Stickstoffbedarf ist wie beim Mais standort- sowie sortenspezifisch und liegt im Mittel bei etwa 170 kg N ha⁻¹. Auch hier werden mehrere zeitlich angepasste Düngegaben empfohlen (DIEPENBROCK et al., 2005; FARACK et al., 2008). Weizen benötigt je nach Ertrag, Sorte und Standort zwischen 350 mm und 500 mm Wasser, besitzt aber im Vergleich zu Mais einen deutlich niedrigeren Transpirationskoeffizienten (TK). Dieser Wert ist reziprok zur WNE und beschreibt die Menge an Wasser, welche benötigt wird, um ein Kilogramm Trockenmasse zu erzeugen. Der TK in l kg⁻¹ TM für Mais liegt zwischen 300 – 400 und der für Weizen bei 400 – 600 (DIEPENBROCK et al., 2005; MAUSER, 2007). Demnach kann Mais aus einem geringeren Wasservorrat höhere Erträge als Weizen realisieren. Weiterhin nimmt die WNE von Mais im Vergleich zu Weizen bei zunehmender Lufttrockenheit zu. Besonders relevant wird dieser Fakt auf sandigen, trockenen Standorten, da Mais hier wesentlich besser in der Lage ist, das vorhandene Wasser effektiv zu nutzen (EHLERS, 2013; FARACK et al., 2008; SCHITTENHELM, 2009).

3. Fragestellung

Im Ergebnis der Literaturrecherche ergibt sich die Notwendigkeit, einen Überblick über die potentielle Eignung unterschiedlicher natürlicher Rohstoffe als Bodenverbesserungsmittel nach EG (98/488/EG) zu geben. Bei Einbringung in einen sandigen Boden sollen diese zur Verbesserung seiner bodenchemischen, –physikalischen und -biologischen Eigenschaften führen. Auch ist aufgrund der sich zunehmend ändernden klimatischen Bedingungen eine Differenzierung der Wirkung der unterschiedlichen Rohstoffe auf C₄-Pflanzen wie Mais und C₃-Pflanzen wie Weizen von Relevanz.

Aus den bisher durchgeführten wissenschaftlichen Studien zeigt sich für die Rohstoffe Birtreber und Rohwolle vom Schaf eine prinzipielle Eignung als Bodenverbesserungsmittel. Dennoch sind nur wenige Untersuchungen verfügbar, die eine Verifizierung der bisher durchgeführten Arbeiten erlauben. Aufgrund der Komplexität des Themas ergeben sich umfangreiche Fragestellungen, die in dieser Arbeit in drei Themenkomplexen behandelt werden. Der schematische Aufbau der Themenkomplexe und deren Schwerpunkte sind in Abb. 1 dargestellt.

Inhaltlich bauen die Themenkomplexe aufeinander auf, sodass im Ergebnis der Untersuchungen eine Verifizierung der durch die Literatur festgestellten Eignung der Rohstoffe als Bodenverbesserungsmittel nach EG (98/488/EG) getroffen werden kann. In den Themenkomplexen 1 und 2 wurden sowohl biotische (Wachstum und Entwicklung einer einfachen Versuchspflanze) als auch abiotische Strukturen (Mineralisierung, Nährstoffgehalte, bodenphysikalische Parameter) untersucht. Schwerpunkt im ersten Themenkomplex war die Auswahl und Charakterisierung potentieller Rohstoffe. In Themenkomplex 2 wurden Gewächshausversuche an höheren Kulturpflanzen unter kontrollierten Bedingungen mit den ausgewählten Rohstoffen durchgeführt. Ziel war es festzustellen, ob sich die in Themenkomplex 1 erzielten Ergebnisse der biotischen und abiotischen Strukturen bestätigen lassen. Ergänzend zu den Fragestellungen aus Themenkomplex 1 wurden bei den Untersuchungen der biotischen Strukturen die Beeinflussung von Versuchspflanzen bei Trockenstress sowie die resultierenden Ertragsparameter betrachtet. Bei den Untersuchungen der abiotischen Strukturen lag der Fokus insbesondere auf der Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit des Ausgangssubstrates. In Themenkomplex 3 war vor allem der Einsatz der in Themenkomplex 1 ausgewählten Roh-

stoffe unter realen Wachstumsbedingungen im Freiland relevant. Es sollten Aussagen über die Persistenz der Rohstoffe im Boden getroffen sowie die Beeinflussung des Bodenlebens untersucht werden.

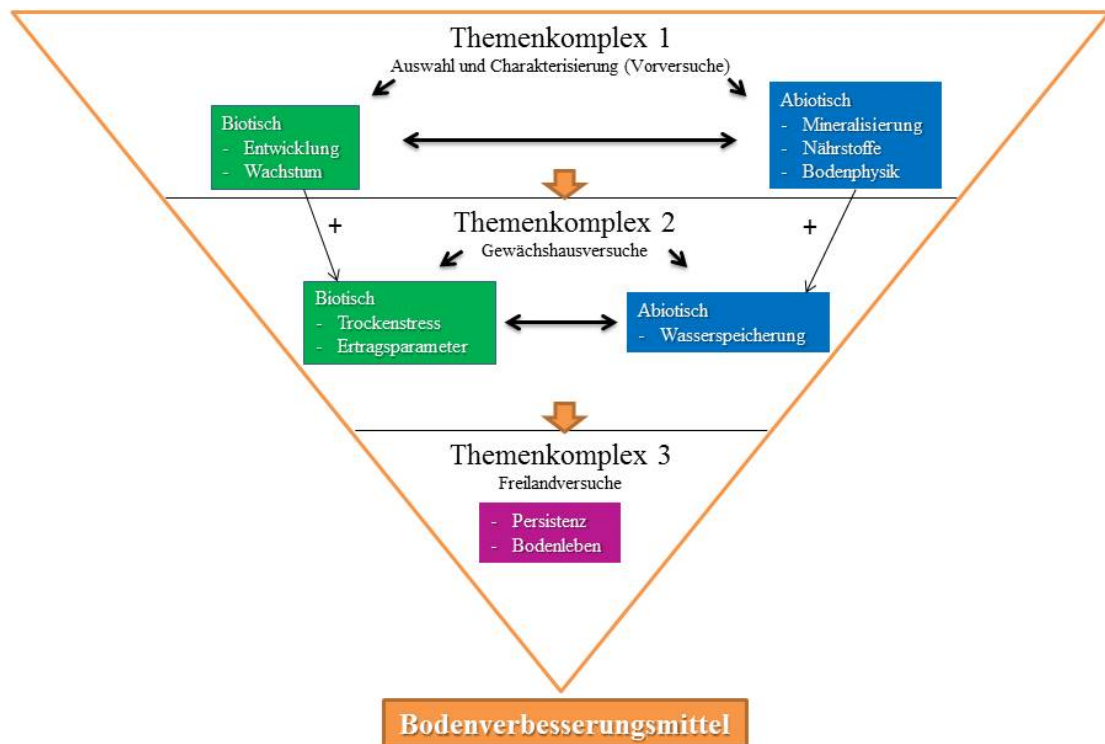


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Themenkomplexe und deren inhaltliche Schwerpunkte

Im Folgenden werden die konkreten Fragestellungen der jeweiligen Themenkomplexe aufgezeigt:

Themenkomplex 1: Vorversuche

Zusätzlich zu Biertrebern und Rohwolle vom Schaf lassen sich die in Kapitel 5.1 genannten Rohstoffe als potentielle Bodenverbesserungsmittel identifizieren. In der Literatur werden zumeist Untersuchungen mit Substraten wie Torf oder Perlite als Grundlage durchgeführt, natürliche Böden werden hingegen kaum genutzt (vgl. Kapitel 2). Ein weiterer Schwerpunkt dieses Themenkomplexes ist es, durch die Zugabe der Rohstoffe eine Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit eines sandigen Bodens sowie eine nachhaltige Zuführung von Nährstoffen zu erreichen. Daher ergeben sich folgende Fragestellungen:

- (1) Welche der betrachteten Rohstoffe erweisen sich als geeignet, positiv auf das Pflanzenwachstum zu wirken und welche Aufwandmengen zeigen hierbei die besten Ergebnisse?*
- (2) Welche charakteristischen physikalischen und chemischen Eigenschaften lassen sich an den untersuchten Rohstoffen identifizieren?*

Themenkomplex 2: Gewächshausversuche

Die in Themenkomplex 1 als geeignete Bodenverbesserungsmittel identifizierten Rohstoffe sollen in diesem Abschnitt auf Ihre prinzipielle Eignung im Pflanzenbau überprüft werden. Die Gewächshausversuche ermöglichen Untersuchungen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen. Insbesondere die Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter werden in der bestehenden Literatur kaum behandelt. Daher liegt der Fokus hier vor allem auf der Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bei Einarbeitung der Rohstoffe in ein sandiges Substrat. Zudem soll überprüft werden, ob die in der Literatur an unterschiedlichen Versuchspflanzen festgestellten ertragssteigernden Effekte verifiziert werden können. Da Mais als C_4 -Pflanze und Weizen als C_3 -Pflanze differenzierte Standortansprüche aufweisen und eine hohe Bedeutung in der Agrarwirtschaft besitzen (vgl. Kapitel 2), wurden diese als Versuchspflanzen ausgewählt. Für den Themenkomplex 2 ergeben sich daher folgende Fragestellungen:

- (3) Kommt es durch die Anwendung der Rohstoffe zu Unterschieden in Wachstum, Entwicklung, Vitalität und Erträgen und gibt es Differenzierungen zwischen C_4 - und C_3 -Pflanzen?*
- (4) Wird durch die Einarbeitung der Rohstoffe in den Boden mehr pflanzenverfügbares Wasser auch unter Wassermangelbedingungen bereitgestellt als bei reinem bzw. mit Mineraldünger behandeltem Substrat?*

Themenkomplex 3: Freilandversuche

Aus der Literatur ist ersichtlich, dass bisherige Untersuchungen insbesondere unter kontrollierten Gewächshausbedingungen an Pflanzen wie Kräutern oder Gemüsesorten vorgenommen wurden. Versuche unter statistisch auswertbaren Freilandbedingungen und an ackerbau-relevanten Kulturen sind hingegen selten und häufig in tropischen Regionen durchgeführt worden (vgl. Kapitel 2). In diesem Themenkomplex soll daher untersucht werden, wie die

eingesetzten Rohstoffe unter realen Bedingungen auf sandigem Substrat in den gemäßigten Breiten auf Entwicklung und Ertrag von Kulturpflanzen wirken. Da in der Projektlaufzeit von Januar 2014 bis September 2015 auch die Wirkung auf eine Kulturfolge untersucht werden sollte, wurde zunächst Sommerweizen und in Folge Winterweizen angebaut. Außerdem soll eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Gewächshausversuche aus Themenkomplex 2 geprüft werden. Abschließend sind Aussagen über die jeweilige Eignung der untersuchten Rohstoffe zu treffen, womit sich folgende Fragestellungen ergeben:

- (5) Können die in Themenkomplex 1 und 2 nachgewiesenen Effekte auf bodenphysikalische und –chemische Parameter auch im Freiland festgestellt werden, sodass ertragssteigernde Effekte in Qualität und Quantität nachgewiesen werden können und sind diese langfristig?*
- (6) Lassen sich durch die Einarbeitung von Rohwolle Unterschiede in Boden und Pflanze ermitteln, die abhängig von der Aufwandmenge bzw. dem Einarbeitungszeitpunkt sind?*

4. Standortbeschreibung

Das Bodensubstrat für alle durchgeführten Versuche wurde aus den oberen 0,25 m der Freilandversuchsfläche entnommen. Die Fläche ist Teil der Versuchsflächen der Lehr- und Forschungsstation am Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften des Standorts Dahlem der HU zu Berlin. Diese befinden sich im südwestlichen Stadtgebiet auf $52^{\circ} 28' N$; $13^{\circ} 18' S$ und ca. 51 m ü. NN (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Freilandversuchsfläche (FU 7/8) am Standort der HU zu Berlin Dahlem (Google Earth, Stand: 2012)

Klimatisch lässt sich die Region in das feucht-temperierte Klima Westeuropas mit kontinentaler Beeinflussung einordnen. Zudem weist sie während der Hauptwachstumsperiode ein regionales Negativsaldo der klimatischen Wasserbilanz auf (vgl. Abb. 3). Hier ist ebenfalls zu erkennen, dass die beiden Versuchsjahre 2014 und 2015 ähnliche Temperaturverläufe über das Jahr aufwiesen, welche mit den langjährigen Monatsmitteltemperaturen von 1981-2010 vergleichbar sind. Deutliche Unterschiede konnten allerdings in den monatlichen Niederschlagssummen festgestellt werden. So ist das Jahr 2014 in der Hauptwachstumsperiode von Mai bis Juli im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich zu nass. Im Jahr 2015 hingegen liegen die Niederschlagssummen von Februar bis August deutlich unter denen des langjährigen Mittels von 1981 bis 2010.

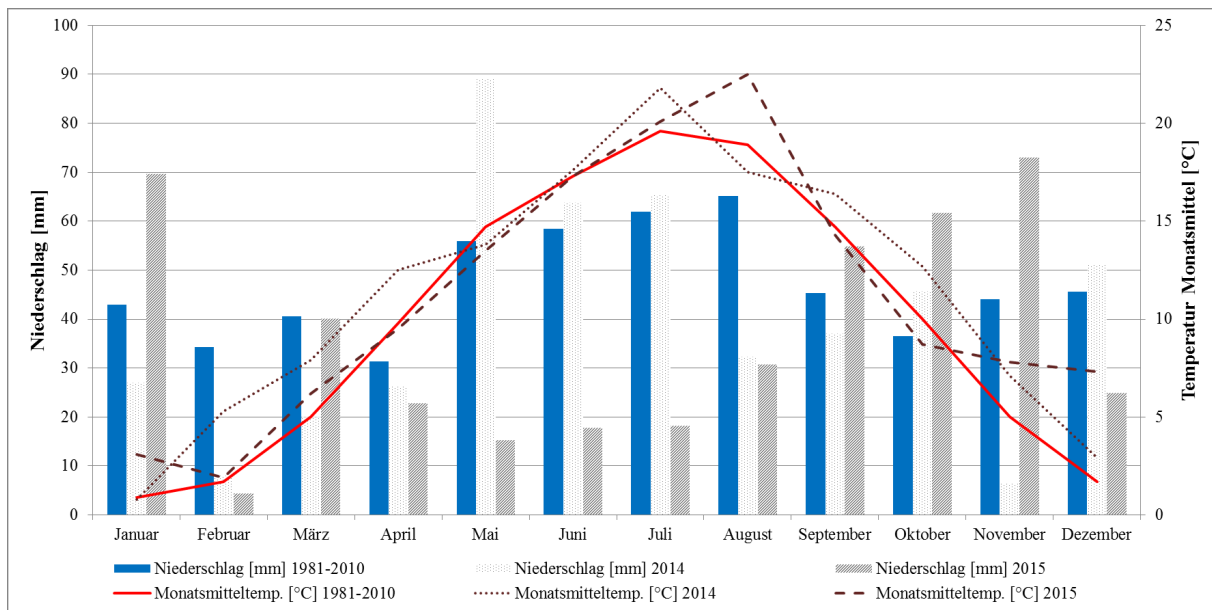


Abb. 3: Monatlicher Niederschlag und Monatsmitteltemperatur in den Versuchsjahren 2014 und 2015 sowie im langjährigen Mittel (1981-2010) am Standort Dahlem

Geomorphologisch liegen die Flächen auf der Teltow-Hochfläche. Hierbei handelt es sich um eine weichselkaltzeitliche flachwellige Grundmoränenplatte, die während des Brandenburger Stadiums gebildet wurde. Charakteristisch sind teilweise durch periglaziäre Sande bedeckte Geschiebelehme und –mergel mit Mächtigkeiten zwischen zwei bis vier Metern, aber auch schubbedingte sandige Injektionskeile oder –zähne können oberflächennah anstehen. Wie auch am Versuchsstandort der Fall, sind die vorherrschenden Bodentypen Braunerde und Fahlerde (LUTZE et al., 2014; SCHROEDER und NOWEL, 2001; SCHWEITZER, 2014). Aufgrund der Genese und der resultierenden geomorphologischen Gegebenheiten lassen sich innerhalb kleinräumiger Bereiche starke Standortheterogenitäten in den Horizontabfolgen und Mächtigkeiten erwarten. Bestätigt wird diese Annahme durch die detaillierten Untersuchungen des Standortes Dahlem von SÜMER (2013). Aus diesem Grund ist im Vorfeld der Versuchsreihen im Gewächshaus und Freiland eine umfassende bodenkundliche Charakterisierung der Freilandversuchsfläche erfolgt. Die für die Untersuchungen genutzte Freilandversuchsfläche (FU 7/8) im südöstlichen Bereich des Standortes Dahlem weist eine ähnliche Horizontabfolge auf wie das Leitbodenprofil des Standortes¹. Dennoch ist an der Versuchsfläche ein reliktsicher Pflughorizont identifiziert worden, welcher im Leitbodenprofil nicht erkennbar war. Generell lässt sich aber ein gepflügter Oberbodenhorizont mit gleichmäßiger Humusverteilung (Ap- bzw. rAp-Horizont) mit einer scharfen Abgrenzung zu den darunter liegenden Horizonten Bv-

¹ <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/einrichtungen/freiland/dahlem/profil-dahlem.pdf> (Stand 09.08.2016)

Ael, Ael+Bt und Bt identifizieren. Der Bv-Ael-Horizont ist durch Verlagerungsprozesse von Ton vergleichsweise aufgehellt. Beim Ael+Bt-Horizont handelt es sich um einen Verzahnungshorizont, der an einigen Stellen Charakteristika des Ael- und an anderen des Bt-Horizontes aufweist. Der Bt-Horizont ist durch Einwaschungsprozesse deutlich mit Ton angereichert (vgl. Abb. 4 und Abb. 6).

Bodentyp: Braunerde-Fahlerde

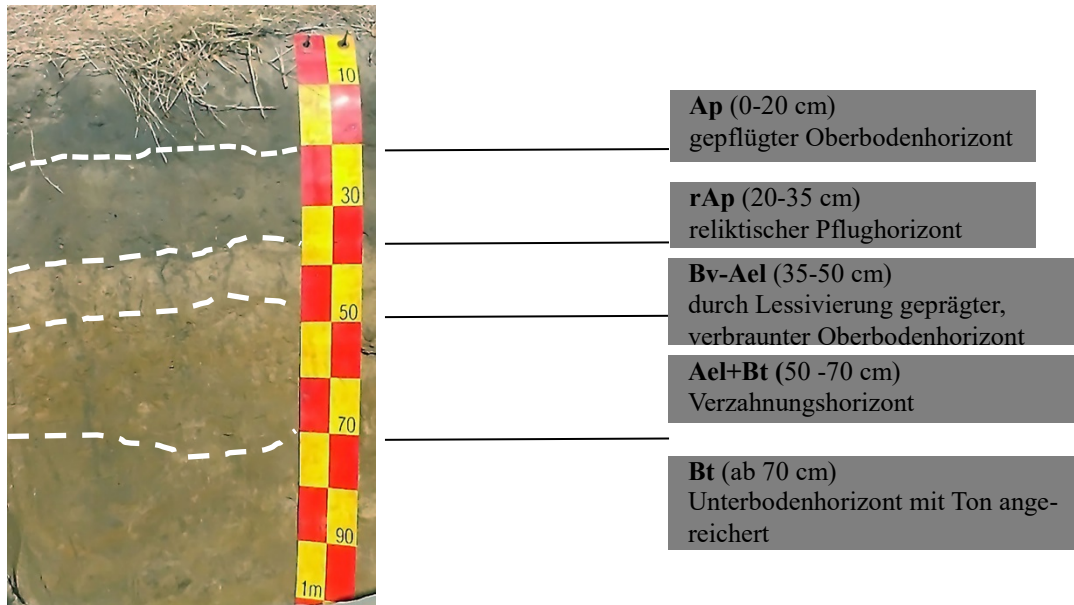


Foto K. Garz (08.04.2014)

Abb. 4: Bodenprofil (52°27'59.39" N und 13°18'05.18" S) der Versuchsfläche (FU 7/8)
Foto: K. Garz (08.04.2014)

Die Mächtigkeiten der einzelnen Horizonte innerhalb der Versuchsfläche variieren stark. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine detaillierte Aufnahme der Horizontabfolgen über die gesamte Versuchsfläche durchgeführt. Insgesamt wurden 240 Punkte in einem gleichmäßigen Raster mittels Pürckhauer sondiert. Anschließend wurden mit Surfer 8 mit der Kriging Methode Modelle der Horizontmächtigkeiten der Versuchsfläche berechnet. Anzumerken ist, dass hier aufgrund der Sondierungsmethode eine Differenzierung zwischen dem Ap- und dem rAp-Horizont nicht möglich war, sodass zusammenfassend nur die Bezeichnung Ap-Horizont genutzt wird.

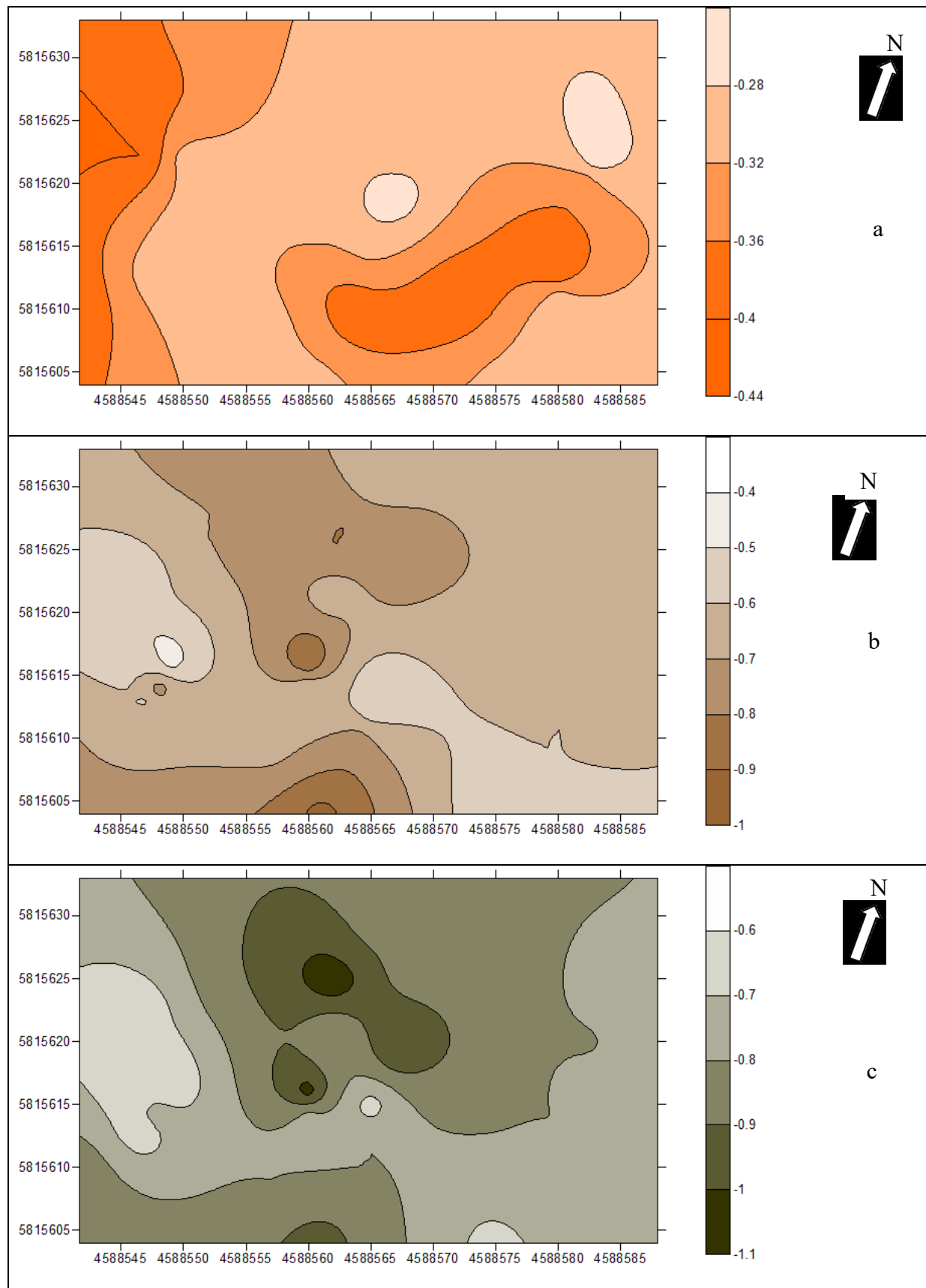


Abb. 5: Abbildungen der unteren Horizontkanten [m u. GOK] der Versuchsfläche (FU 7/8) am Standort Dahlem (a=Ap-Horizont; b=Bv-Ael-Horizont; c= Ael+Bt-Horizont); n= 240

Im Ergebnis lässt sich auf geringen flächigen Ausdehnungen eine deutliche Heterogenität der Horizontmächtigkeiten feststellen. So sind Mächtigkeiten des Ap-Horizontes von bis zu 0,4 m insbesondere im westlichen und südöstlichen Bereich der Versuchsfläche verortet. Auch der Bv-Ael-Horizont weist vor allem im mittleren Bereich der Versuchsfläche hohe Mächtigkeiten auf und erreicht teilweise Tiefen von bis 1,0 m u. GOK. Der Verzahnungshorizont Ael+Bt ist in seinen Mächtigkeiten von 0,1 m bis 0,2 m hingegen relativ homogen und spiegelt in seiner Struktur in etwa den Bv-Ael-Horizont wider (vgl. Abb. 5).

Einhergehend mit einer Änderung der Bodenhorizonte ist aufgrund der Pedogenese auch immer eine Änderung der Textur sowie der physikalischen und chemischen Eigenschaften der entsprechenden Substrate zu erwarten. Die Korngrößenfraktionierung wurde nach der Methode „Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat - DIN 19683“ im Gemeinschaftslabor Analytik der Lebenswissenschaftlichen Fakultät am Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der HU zu Berlin durchgeführt. Im Ergebnis handelt es sich beim Substrat des Ap- bzw. rAp-Horizontes um schwach lehmigen Sand, beim Bv-Ael-Horizont um mittel lehmigen Sand und beim Ael+Bt-Horizont um stark sandigen Lehm. Für die Bodenschätzung ergibt sich ausgehend vom Bodentyp Braunerde-Fahlerde, der Entstehung im Diluvium und der Hauptbodenart lehmiger Sand die Bezeichnung IS 4 D mit einer Bodenzahl von 37-43 (vgl. BLUME et al., 2011; BODENSYSTEMATIK, 2005). Die Trockenrohdichten, deren Bestimmung nach DIN ISO 11272:2001 erfolgten, steigen mit zunehmender Tiefe an und liegen im Oberboden (Ap- bzw. rAp-Horizont) bei $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ und im Unterboden (Bv-Ael- und Ael+Bt-Horizont) bei ca. $1,8 \text{ g cm}^{-3}$. Der Penetrationswiderstand wurde mit dem mobilen Feldpenetrometer² in MPa mit einer zentimetergenauen Auflösung gemessen. Als Maß für die Bodenstruktur und Durchwurzelbarkeit zeigt sich ein typischer Kurvenverlauf gepflügter Ackerböden nach der Winterruhe. Der maximale Widerstand von 3,5 MPa ist für einen sandigen Boden als gering anzusehen (vgl. GRÜTER, 2015). Bedingt durch die Bodensetzung ist eine Verfestigung des Bodens in den oberen 0,1 m zu erkennen. Zudem weist der Standort eine Substratverdichtung an der Pflugsohle auf, die bei etwa 0,2 m u. GOK beginnt und ihren maximalen Widerstand bei etwa 0,3 m u. GOK erreicht (vgl. Abb. 6).

² www.ugt-online.de/produkte/bodenkunde/penetrometer/mobiles-feldpenetrometer/.de (Stand: 12.08.2016)

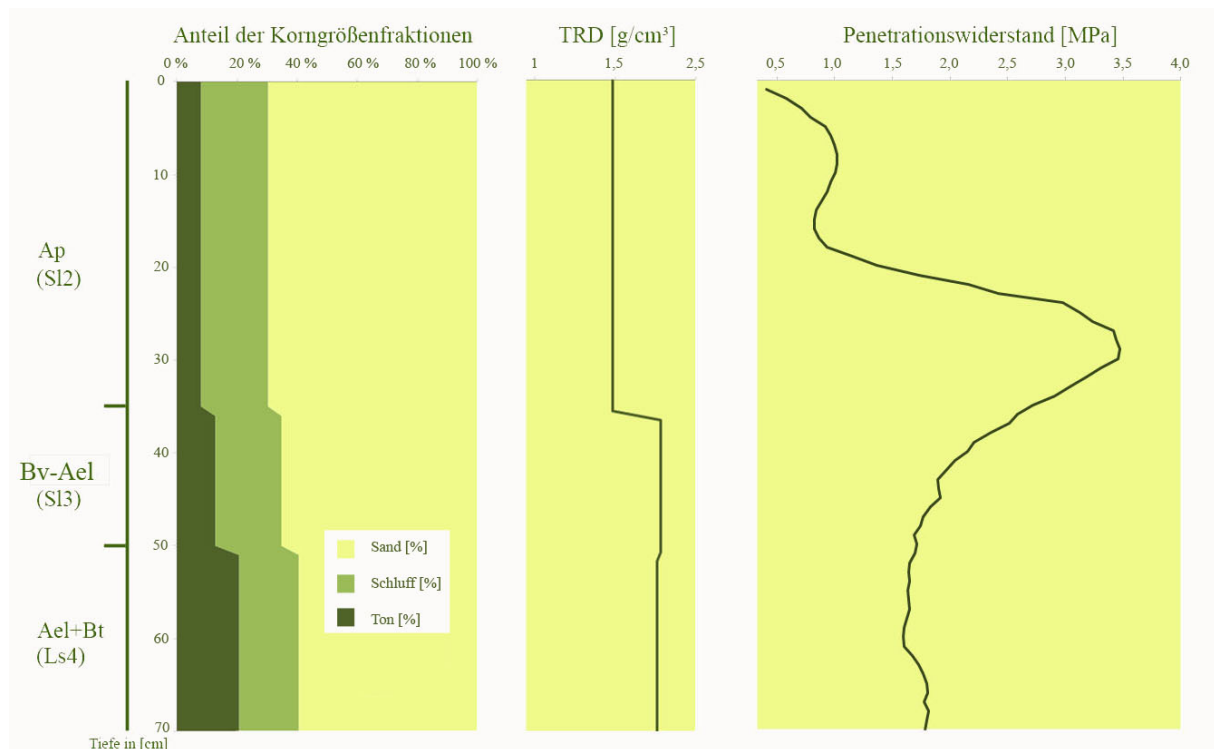


Abb. 6: Vertikale Differenzierung der Korngrößenfraktionen (n= 5), der Trockenrohdichte (n= 5) und des Penetrationswiderstandes (n= 300)

Mit dem vertikalen Substratwechsel ändern sich auch die bodenchemischen Kennwerte (vgl. Tab. 1). Das C/N-Verhältnis für diesen Standort ist typisch für Acker- und Grünlandböden Mitteleuropas und steigt mit zunehmender Tiefe an. Je enger dieses Verhältnis ist, umso größer ist in der Regel der Huminsäureanteil der organischen Substanz. Hieraus lässt sich das Maß für die Humusqualität ableiten, welche für diesen Standort mit der Einstufung hq4 hoch ist. Die pH-Werte liegen mit der Einstufung s1 bis s2 im sehr schwach bis schwach sauren Bereich (BODENSYSTEMATIK, 2005). In den oberen 0-35 cm sind aufgrund der Humusakkumulation und der Bodenbearbeitung mit einhergehenden Düngemaßnahmen die höchsten Gehalte an organischem Kohlenstoff, Phosphor und Stickstoff zu verzeichnen. Mit zunehmender Tiefe kommt es erwartungsgemäß zu einem Rückgang der Gehalte. Die C_{org} -Gehalte liegen mit 1,18%, im Vergleich zu den von der BGR 2007 ermittelten statistischen Kennwerten der C_{org} -Gehalte (%) in der Bodenausgangsgesteinsgruppe Deckschichten über Geschiebemergel/-lehme, leicht über dem ermittelten Mittelwert für Ackerstandorte des nordöstlichen Klimagebietes Deutschlands von 1,0% (vgl. DÜWEL et al., 2007). Durch die Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt ist 2008 die Handlungsempfehlung „Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV)“ herausgegeben worden. Nach dieser erfolgt eine Einstufung der Bodenart für den Ap- bzw. rAp-Horizont (schwach lehmiger Sand) in die Bodengruppe BG 2. Unter Be-

rücksichtigung des pH-Wertes von ≤ 7 liegt ein sehr hoher Nährstoffgehalt (Gehaltsklasse E) für Phosphor (nach DL-Methode bestimmt) vor, für den demnach keine Düngebedürftigkeit gegeben ist (WULFEN et al., 2008). Weiterhin lassen sich auch in den tieferen Bodenhorizonten vergleichsweise hohe Phosphorgehalte erkennen, was auf Auswaschungsprozesse aus dem oberen Horizont hindeutet. Ähnliches lässt sich auch für Kalium und Magnesium feststellen. Hier nehmen die Gehalte mit zunehmender Tiefe am Standort deutlich zu. Diese Anstiege lassen sich zudem durch den Substratwechsel von sandigem zu tonigem Material mit zunehmender Tiefe erklären, da diese Nährstoffe auch durch Verwitterungsprozesse von tonigem Ausgangsmaterial pflanzenverfügbar werden. Sowohl die Kalium-Gehalte (nach DL-Methode bestimmt) als auch die Magnesium-Gehalte (nach CaCl_2 -Methode bestimmt) liegen im Ap- bzw. rAp-Horizont im optimalen Bereich (Gehaltsklasse C), sodass von einer mittleren Düngebedürftigkeit ausgegangen wird (WULFEN et al., 2008).

Tab. 1: Bodenchemische Kennwerte der Versuchsfläche FU 7/8 am Standort Dahlem für 2014; (n=2)

Horizont	C_{org}	Nt	Mg_{CaCl2}	K_{DL}	P_{DL}	C/N	pH
	[%]	[%]	[mg 100g⁻¹]	[mg 100g⁻¹]	[mg 100g⁻¹]		
Ap (rAp)	1,18	0,100	5,63	8,67	32,72	12,3	6,00
Bv-Ael	0,14	0,010	4,52	16,05	7,02	12,4	6,03
Ael+Bt	0,06	0,004	10,43	40,64	9,45	12,9	6,27

Informationen über angebaute Kulturen, mineralische bzw. organische Düngung, den Zwischenfruchtanbau sowie Herbizid-, Fungizid- und Insektizidbehandlungen der Versuchsfläche FU 7/8 für die Jahre 2009 bis 2013 finden sich im Anhang (vgl. Anhang Tab. A 1) .

5. Themenkomplex 1: Vorversuche

5.1 Auswahl der Rohstoffe

Die Auswahl der untersuchten Rohstoffe als potentielle Bodenverbesserungsmittel wurde auf Grundlage der Absprachen mit dem Projektpartner der YARA ZIM Plant Technology GmbH, einer ausführlichen Literaturrecherche und unter Berücksichtigung einer studentischen Vorarbeit (vgl. KONOPATZKI, 2013), durchgeführt. Folgende Kriterien für die Auswahl der Rohstoffe waren hierbei von besonderer Relevanz:

1. Es musste sich um einen Abfall- oder Reststoff natürlicher Rohstoffe bzw. ein hieraus aufbereitetes Produkt handeln.
2. Es musste eine potentielle Eignung, ein sandiges Substrat in seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen, vorhanden sein.
3. Es musste eine Verfügbarkeit in größeren und möglichst kostengünstigen Mengen gewährleistet sein.

Folgende Rohstoffe haben die genannten Kriterien erfüllt: Zwei Braunalgenarten aus dem Pazifik vor der chilenischen Küste (*Lessonia nigrescens* in Folge abgekürzt mit L.N. und *Lessonia trabeculata* in Folge abgekürzt mit L.T.), Alginat (E 402), Hornkraut (Hornk.), Wasserpflanzen (ein Gemisch hauptsächlich aus Hornkraut, Wasserlinse; Pfeilkraut und Wasserpest in Folge abgekürzt mit Wp) aus der Müggelspree, Rohwolle oder auch Wolle genannt (W) vom Schaf (hauptsächlich von Heidschnucken und Pommernschafen), Schafwollpellets oder auch Pellets genannt (P). Letztere sind durch die Firma florapell aus Rohwolle vom Schaf gepresst worden. Außerdem wurde Biertreber, oder auch Treber genannt (T), einer regionalen Braumanufaktur (Forsthaus Templin) untersucht.

5.2 Wachstumsversuche mit Koriander

5.2.1 Einleitung

Zunächst wurden Wachstumsversuche an Koriander (*Coriandrum sativum*) mit den in Kap. 5.1 genannten Rohstoffen durchgeführt, um deren prinzipielle Eignung als Bodenverbesserungsmittel feststellen zu können. Koriander wurde ausgewählt, da er auf Stickstoffmangel mit einer verminderten Wassernutzungseffizienz reagiert. Dieser Effekt wird insbesondere deutlich durch nekrotische Ausbildungen an den Blättern (KUMAR et al., 2008). Weiterhin konnte in der Vergangenheit eine starke Beeinflussung durch Versalzungserscheinungen auf die Keimung und das Wachstum von Koriander festgestellt werden (ZIDAN und ELEWA, 1994). Zudem wächst Koriander langsamer als beispielsweise Kresse, sodass auftretende Effekte wie Nährstoffmangel sich deutlicher ausprägen und über einen längeren Zeitraum beobachtet werden können. Daher erwies sich Koriander für die Zielstellung, die Rohstoffe auf deren inhibitorische und toxische Wirkungen zu untersuchen sowie die optimalen Aufwandmengen zu ermitteln, am geeignetsten.

5.2.2 Material und Methoden

Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen von je ca. einem Monat Dauer durchgeführt (vgl. Tab. 2). Um eine statistische Signifikanz der Ergebnisse gewährleisten zu können, wurden je Variante mindestens vier Wiederholungen betrachtet. Zudem sind die Pflanzcontainer in vier Reihen voll randomisiert aufgestellt worden. Für die statistische Auswertung wurde die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte (\bar{x}) sowie der Standardabweichungen (σ) durchgeführt.

Tab. 2: Übersicht der Versuchsreihen zu den Wachstumsversuchen mit Koriander

Versuchsreihe	Anzahl der Töpfe (gesamt)	Wiederholungen je Variante und Konzentrationsstufe	Getestete Rohstoffe (Varianten)	Konzentrationsstufen [M.-%]	Zeitraum
1	68	4	Braunalgen (L.N. und L.T.), Schafwollpellets, Biertreber, Kontrolle	0,1; 0,5; 1,0; 2,0	10.03.2014 bis 15.04.2014
2	68	4	Alginat, Hornkraut, Rohwolle, Wasserpflanzen, Kontrolle	0,1; 0,5; 1,0; 2,0	28.07.2014 bis 08.09.2014

Die Braunalgen wurden von der YARA ZimPlant Technology GmbH zur Verfügung gestellt und lagen in zerkleinerter (ca. 0,5 mm) und getrockneter Form vor. Das Alginat wurde in-

dustriell extrahiert und gereinigt und als handelsübliches E 402 über das Internet bezogen. Bei dem Hornkraut handelte es sich um bereits seit drei Jahren eingelagertes, staubfein gemahlenes und getrocknetes Material. Aus der Müggelspree konnten im Rahmen der jährlich durch den Wasser- und Abwasserverband Berlin durchgeführten Entkrautungsmaßnahmen Wasserpflanzen genutzt werden. Da es sich hier um frisches und feuchtes Material handelte, wurde dieses zunächst 48 h im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet. Bei der Rohwolle vom Schaf war es notwendig, diese für alle durchgeführten Versuche auf ca. ein bis zwei Zentimeter zu zerkleinern. Ebenso wie die Wasserpflanzen wiesen auch die Biertreber eine hohe Materialfeuchte auf, sodass auch hier eine Trocknung im Trockenschrank über 48 h bei 60 °C für alle weiteren Versuche notwendig war. Eine Nutzung der Schafwollpellets war ohne weitere Aufbereitungsschritte möglich.

Insgesamt wurden je Rohstoff jeweils vier Varianten in vierfacher Wiederholung untersucht. So sind in das Ausgangssubstrat (vgl. Kap. 5.2.3) 0,1 M.-%; 0,5 M.-%; 1,0 M.-% und 2,0 M.-% der jeweiligen Rohstoffe eingemischt worden. Zusätzlich zu den Rohstoffen wurde in jeder Versuchsreihe eine Kontrollgruppe betrachtet, bei der als Wachstumsmedium das reine Ausgangssubstrat ohne weitere Rohstoffe genutzt wurde.

5.2.3 Versuchsaufbau

Ausgangssubstrat und Vorbereitung der Pflanzcontainer

Als Wuchsmedium für sämtliche Pflanzversuche, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden, ist der Oberboden der Freilandversuchsfläche genutzt worden. Hierzu wurde am 25.02.2014 das Ausgangssubstrat aus den oberen 25 cm der Fläche entnommen. Bei diesem Arbeitsschritt war vor allem darauf zu achten, dass das Ausgangssubstrat ausschließlich aus dem Ap- bzw. rAp-Horizont stammte. Nach zweiwöchiger gegen Niederschlag geschützter Lufttrocknung und mehrmaligem Wenden des entnommenen Ausgangssubstrates wurde dieses in Vorbereitung auf die Pflanzversuche zunächst auf eine maximale Korngröße von 1 cm gesiebt. Anschließend wurden je 1 kg Ausgangssubstrat-Rohstoffgemische vorbereitet (vgl. Tab. 3) und die Pflanzcontainer, die einen Durchmesser und eine Höhe von je 13 cm hatten, gefüllt. Zur Herstellung der Pflanzsubstrate wurde eine Vergleichbarkeit mit den Bedingungen der Freilandversuchsfläche angestrebt. Aufgrund der geringen Größe der Pflanzcontainer konnte die ermittelte Trockenrohdichte von 1,5 g cm⁻³ der Freilandversuchsfläche (vgl. Kap.4) jedoch nicht definiert eingestellt werden. Um dennoch eine möglichst gleichmä-

ßige Verdichtung der Substratgemische zu erreichen, wurden diese in zehnfacher Wiederholung mittels Handrücken von einer Person angedrückt.

Tab. 3: Mengenangaben der jeweiligen Mischungsverhältnisse von Ausgangssubstrat und Rohstoffen in den Vorversuchen

Rohstoff [M.-%]	0,0	0,1	0,5	1,0	2,0
Menge Substrat [g]	1.000	999	995	990	980
Menge Rohstoff [g]	0,0	1,0	5,0	10,0	20,0

Anschließend wurden alle Pflanzcontainer an drei aufeinanderfolgenden Tagen mit jeweils 20 ml Wasser bewässert, um eine möglichst gleichmäßige Durchfeuchtung der Substratgemische zu erzielen. Zur Vermeidung mikroklimatischer Einflussfaktoren wie beispielsweise punktueller Sonneneinstrahlung sowie Randeffekten sind die Pflanzcontainer in einem randomisierten Versuchsaufbau aufgestellt worden.

Aussaat und Bewässerung

Das Saatgut wurde zum Vorquellen zunächst in einen abgedunkelten und belüfteten Erlenmeyerkolben mit 2×10^{-4} M CaSO_4 Lösung gegeben. Anschließend wurden je Pflanzcontainer 20 Samen in Abständen von ca. 2 cm mittels Schablone gesetzt und ca. 1 cm mit Erde bedeckt. Die Bewässerung erfolgte mit 0 ml bis 100 ml pro Tag für alle Varianten gleich.

5.2.4 Bonitur

Keimung

Zur Bestimmung der Keimrate wurde bei der Ernte die Anzahl der Pflanzen je Pflanzcontainer ausgezählt und die Abweichungen von den maximal möglichen 20 Individuen bestimmt.

Längenwachstum

Um indirekt Aussagen zum Biomassezuwachs über die Zeit treffen zu können, ist die durchschnittliche Längenzunahme der Pflanzen ermittelt worden. Hierzu wurden je Pflanzcontainer an fünf verschiedenen Stellen Längenmessungen mit Hilfe eines Zollstockes durchgeführt.

Chlorophyllgehalt

Der Chlorophyllgehalt wurde mit dem Chlorophyllmessgerät SPAD-502Plus der Firma Konica Minolta (MINOLTA, 2009) ermittelt. Gemessen wird hierbei der relative Chlorophyllanteil.

Der gemessene SPAD-Wert korreliert mit dem relativen Stickstoffgehalt der Blattspreite. Demnach sind durch die Messung indirekte Aussagen über die Stickstoffversorgung der Pflanzen möglich. Je Pflanzcontainer wurden Messungen an 10 Pflanzen durchgeführt. Durch das Gerät wurde automatisch der arithmetische Mittelwert berechnet und ausgegeben.

5.2.5 Ernte

Die Ernte erfolgte vor Ausbildung der Blütenstände, sodass nur die Blätter in ihren Eigenschaften betrachtet werden konnten. Zunächst wurden die Einzelpflanzen ebenerdig abgeschnitten. Es folgte je Pflanzcontainer die Bestimmung der Pflanzenfrischmasse (FM) in Gramm. Zur Trockenmassebestimmung (TM) wurden die geernteten Pflanzen 24 h bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und anschließend erneut gewogen.

5.2.6 Ergebnisse und Diskussion

An dieser Stelle sind aufgrund einer übersichtlicheren Darstellung die für die späteren Versuche im Gewächshaus und im Freiland relevanten Rohstoffe bereits farbig in den folgenden Diagrammen hinterlegt worden (vgl. Abb. 7, Abb. 9 und Abb. 10).

Im Ergebnis zeigte die Auszählung der Versuchspflanzen, dass zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe kaum ein Unterschied bei der durchschnittlichen Anzahl der Pflanzen der Kontrollgruppen festgestellt werden konnte. Bei der ersten Versuchsreihe wurden pro Gefäß bei den Kontrollen im Mittel 14 Pflanzen mit einer Standardabweichung von 1,6 und bei der zweiten Versuchsreihe im Mittel 13 Pflanzen mit einer Standardabweichung von 2,6 gezählt. Auffällig sind die Varianten, bei denen dem Ausgangssubstrat die Braunalgenart L.N. sowie das Alginat zugegeben wurden. Hier nahm die Anzahl der Pflanzen mit zunehmender Konzentration des jeweiligen Rohstoffes ab. Bei den Varianten der Braunalge L.T. sowie denen des Biertreibers wiesen die geringen Zugaben von 0,1 M.-% ähnliche Werte wie die Kontrollgruppen auf. Mit Zunahme der Gehalte auf 0,5 M.-% konnten im Mittel 18 bzw. 17 Pflanzen gezählt werden. Diese Werte veränderten sich mit einer weiteren Zunahme der Gehalte auf bis zu 2 M.-% mit Standardabweichungen zwischen 1,22 und 2,17 kaum (+/- eine Pflanze). Ähnlich wie die Versuchsvarianten der Biertreber verhielten sich die der Schafwollpellets. Bei einer geringen Konzentration von 0,1 M.-% waren die Werte ähnlich zu denen der Kontrollgruppe. Ein Maximum an Pflanzen wurde im Mittel mit 18 Individuen bei 0,5 M.-% bzw. 1,0 M.-% mit Standardabweichungen von 2,17 bzw. 1,67 erreicht. Bei 2,0 M.-% war der Wert mit 16 Individuen und einer Standardabweichung von 1,09 deutlich geringer. Die Versuchs-

gruppen, deren Ausgangssubstrat Rohwolle, Hornkraut und Wasserpflanzen zugemischt wurden, verhielten sich mit zunehmender Konzentration untereinander ähnlich. Ein Maximum der mittleren Pflanzenanzahl wurde jeweils bei 0,1 M.-% bzw. 0,5 M.-% erreicht und nahm anschließend bei Konzentrationen von 1,0 M.-% und 2,0 M.-% ab (vgl. Abb. 7).

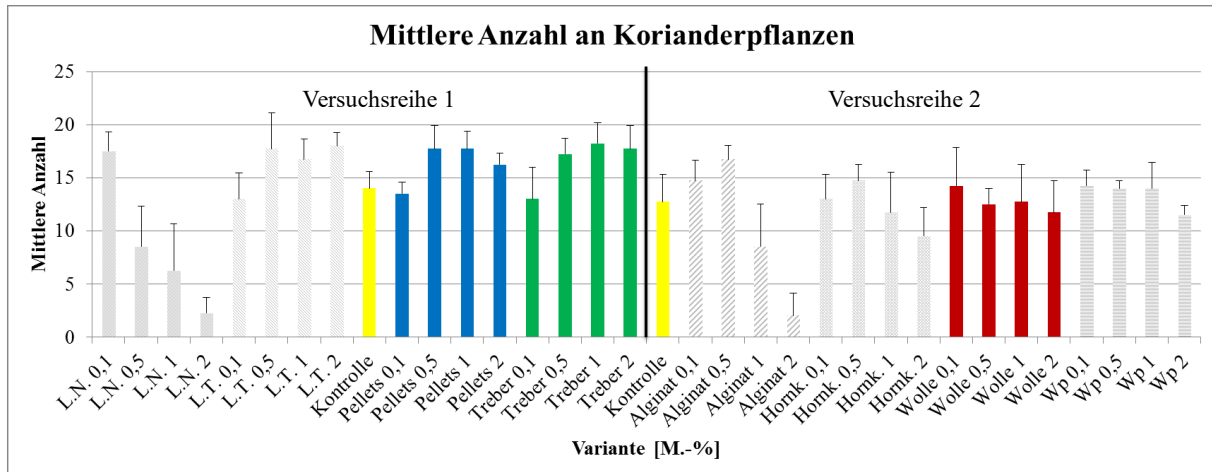


Abb. 7: Mittelwert und Standardabweichung der Anzahl der Korianderpflanzen je Variante bei der Ernte (n=4)

Beim Längenzuwachs wiesen in der ersten Versuchsreihe die Varianten der Schafwollpellets und die der Biertreber im Mittel die höchsten Zuwachsraten über die Zeit und dementsprechend auch die höchste endgültige Länge von 12 cm bis 13 cm auf, wobei die Standardabweichungen in der Regel unter 1 lagen. Im Vergleich dazu erreichte die Kontrolle im Mittel eine Höhe von 4,1 cm mit einer Standardabweichung von 0,22. Die Varianten der Braunalgen haben teilweise nur Längen von 0 cm bis ca. 7 cm erreicht. Auch hier lagen die Standardabweichungen in der Regel unter 1 (vgl. Anhang Tab. A 2). Bei der zweiten Versuchsreihe wurden die höchsten Zuwachsraten durch die Varianten der Rohwolle 0,1 M.-% mit im Mittel 12,88 cm und 0,5 M.-% mit im Mittel 11,38 cm erzielt. Die mittlere Höhe der Kontrolle war mit 5,88 cm etwas höher als in der ersten Versuchsreihe. Ebenfalls ein gutes Längenwachstum konnte bei den Wasserpflanzen mit 1,0 M.-% bzw. 2,0 M.-% mit im Mittel 9 cm bzw. 10,25 cm verzeichnet werden. Dagegen lagen beim Alginat die maximalen Höhen ähnlich wie bei denen der Braunalgen nur zwischen 0 cm und 4,13 cm. Auch die Varianten des Hornkrautes unterschieden sich kaum von der Kontrolle, wiesen aber mit 4,38 cm bis 5,75 cm höhere Werte als die des Alginats auf. Die Standardabweichungen für die zweite Versuchsreihe lagen ebenso wie die der ersten in der Regel unter 1 (vgl. Anhang Tab. A 3). Vor allem die mit Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle behandelten Varianten wiesen im Vergleich zur Kontrollgruppe höhere Chlorophyllgehalte auf, die mit zunehmender Konzentration der Stoffe

im Substrat deutlich anstiegen. Ähnliches zeigten auch die mit Hornkraut und Wasserpflanzen behandelten Varianten, wobei hier die Differenz zur Kontrolle wesentlich geringer ausgeprägt war als bei den bereits genannten. Die Varianten der Braunalge L.T. zeigten mit zunehmender Konzentration eher rückläufige SPAD-Werte, deren Ausprägung denen der Kontrollgruppe ähnlich war. Sowohl bei den Varianten der Braunalge L.N. als auch bei denen des Alginats konnten die SPAD-Werte aufgrund von Welkerscheinungen bzw. fehlender Individuen nur bei den geringen Zugaben von 0,1 M.-% bzw. 0,5 M.-% ermittelt werden (vgl. Abb. 8).

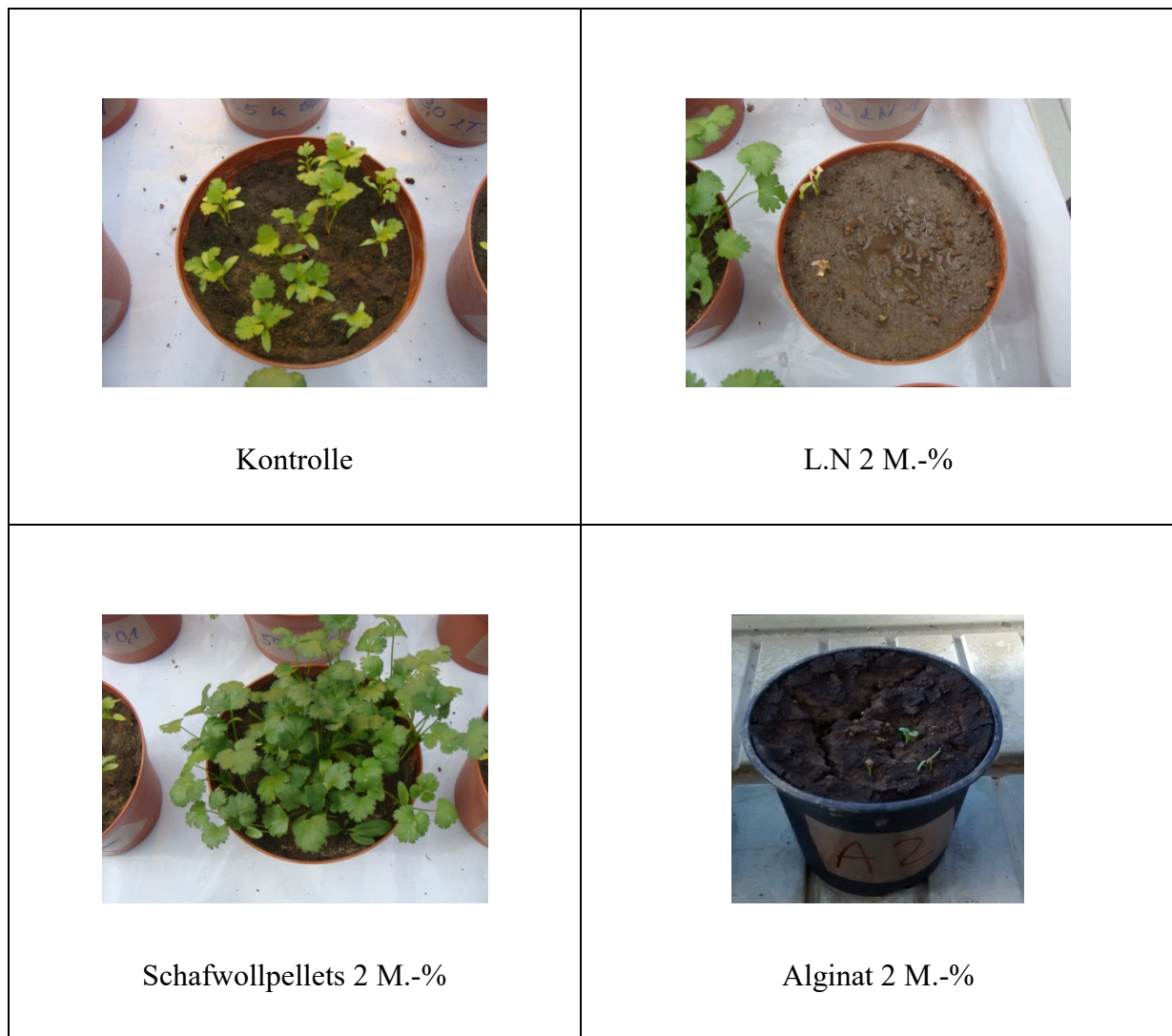


Abb. 8: Fotos zum Zeitpunkt der Ernte der Korianderpflanzen (K. Garz: 15.04.2014 bzw. 08.09.2014) von je einem Pflanzcontainer ausgewählter Varianten

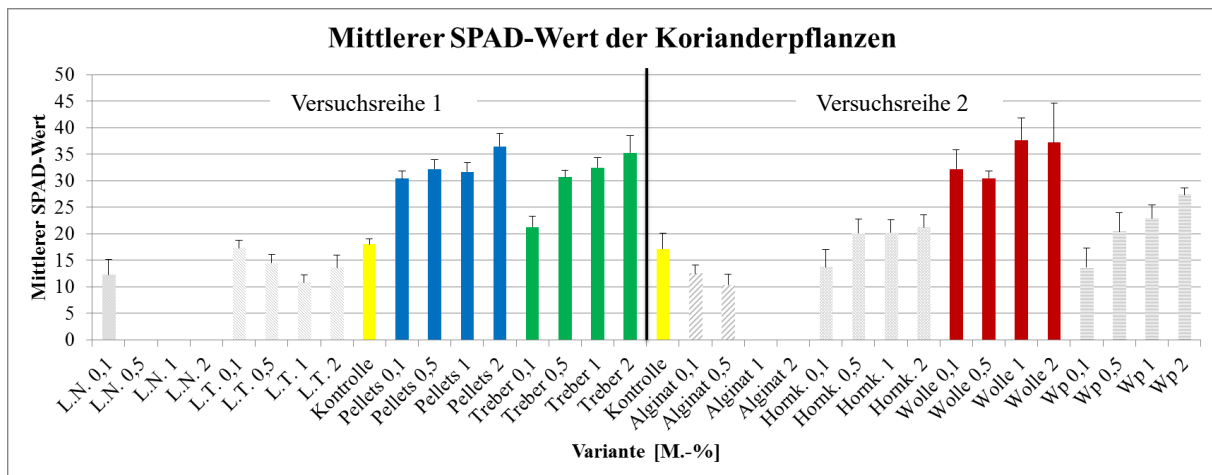


Abb. 9: Mittelwert und Standardabweichung der SPAD-Werte der Korianderpflanzen je Variante bei der Ernte (n=40)

Bei der Bestimmung der Trockenmassen wiesen die Varianten der Schafwollpellets, der Biertreber und der Rohwolle im Vergleich zu den Kontrollen die höchsten Werte auf. Für die Varianten der Braunalgen L.N. und L.T., des Alginats, des Hornkrauts und der Wasserpflanzen konnten nur geringe Differenzen in den Trockenmasseerträgen im Vergleich zu den Kontrollgruppen festgestellt werden (vgl. Abb. 10).

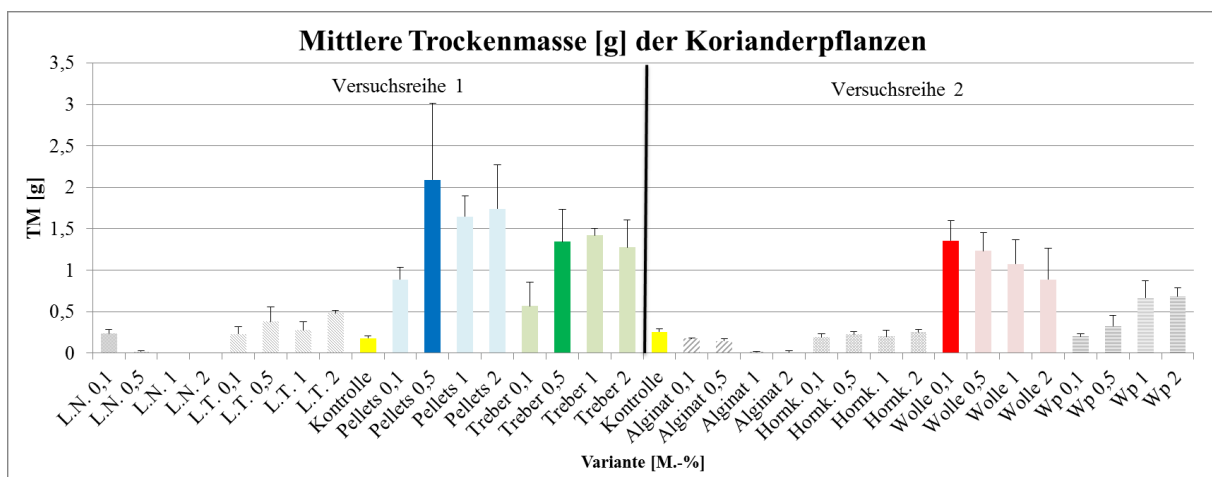


Abb. 10: Mittelwert und Standardabweichung der Trockenmassen der Korianderpflanzen je Variante (n=4)

Im Ergebnis zeigen vor allem die Braunalge L.N. und das Alginat einen wachstumshemmenden Effekt auf Koriander. Mit zunehmenden Konzentrationen wurden bei diesen Rohstoffen eine reduzierte Keimfähigkeit und ein vermindertes Wachstum im Vergleich zu den Kontrollgruppen festgestellt. Für L.N. konnten im späteren Versuchsverlauf sehr hohe Leitfähigkeiten gemessen werden (vgl. Kap. 5.3), die auf eine Versalzung des Materials schließen lassen.

Durch das Alginat kam es auf der Bodenoberfläche zu einer Krustenbildung, die mit zunehmenden Konzentrationen verstärkt ausgebildet wurde und so bereits das Aufkeimen der Pflanzen verhindert hat. Auch eine gleichmäßige Durchfeuchtung des Substrates war nicht möglich, da das Wasser kaum versickern konnte und oberflächlich verdunstet ist (vgl. Abb. 8). Für die Rohstoffe L.T., Hornkraut und Wasserpflanzen konnten im Vergleich zu den Kontrollen keine oder nur geringfügig höhere Chlorophyllgehalte ermittelt werden (vgl. Abb. 9). Hieraus kann abgeleitet werden, dass durch die genannten Rohstoffe nur geringfügig pflanzenverfügbare Nährstoffe zur Verfügung gestellt werden können und somit keine bzw. nur geringfügige positive Effekte auf das Pflanzenwachstum zu erkennen sind. Für die folgenden Untersuchungen konnten aber anhand der Vorversuche mit Koriander drei der untersuchten Rohstoffe in ihrer daraus ermittelten Konzentration ausgewählt werden. Bei den Schafwollpellets und dem Biertreber führte bereits ein Gehalt von 0,1 M.-% zu wesentlich höheren Trockenmasseerträgen und Chlorophyllgehalten als es in den Kontrollgruppen beobachtet werden konnte (vgl. Abb. 9 und Abb. 10). Mit zunehmenden Konzentrationen von 0,5 M.-%, 1,0 M.-% und 2,0 M.-% stiegen diese Werte nochmals an, unterschieden sich untereinander aber nur noch geringfügig. Aufgrund realistischer Aufwandmengen auch in größeren Versuchsanordnungen sind in den nachfolgenden Versuchen Konzentrationen von 0,5 M.-% betrachtet worden. Bei den Varianten mit eingemischter Rohwolle lassen sich bereits bei 0,1 M.-% ähnliche Effekte der genannten Parameter beobachten, die sich mit weiterer Zunahme der Konzentrationen kaum verändern, sodass hier alle weiteren Versuche bereits mit 0,1 M.-% durchgeführt wurden.

5.3 Chemische Charakterisierung

Eine ausführliche chemische Charakterisierung der wichtigsten Makro- und Mikronährstoffe wurde für die im Ergebnis der Pflanzversuche mit Koriander ausgewählten Rohstoffe Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle durchgeführt. Für die Rohstoffe, die sich negativ oder ähnlich der Kontrolle auf Pflanzenwachstum und -entwicklung ausgewirkt haben, konnten aufgrund der begrenzten Projektmittel nur Analysen zum pH-Wert und der Leitfähigkeit durchgeführt werden. Vergleichend zu herkömmlichen Methoden der Bodenverbesserung sind exemplarische Nährstoffgehalte aus Literaturangaben für Gülle dargestellt (vgl. Tab. 4). Eine Übersicht der für die Analysen verwendeten Methoden ist im Anhang in Tab. A 4 zu finden.

Tab. 4: Chemische Charakterisierung der für die weiteren Versuche ausgewählten Rohstoffe (n=2)

Parameter	Einheit	Schafwoll-pellets	Biertreber	Rohwolle	Gülle
TM	[%]	92,56	93,58	90,52	8,00 ³
B	[mg kg ⁻¹]	11,59	3,08	2,16	
Ca	[g kg ⁻¹]	4,60	5,09	0,84	
Cu	[mg kg ⁻¹]	12,33	42,06	7,71	
Fe	[mg kg ⁻¹]	1.477,99	200,04	156,56	
K	[g kg ⁻¹]	39,43	1,40	35,41	45,00 ⁴
Mg	[g kg ⁻¹]	1,43	4,05	0,23	
Mn	[mg kg ⁻¹]	60,38	105,22	7,86	
Mo	[mg kg ⁻¹]	0,68	3,03	0,11	
P	[g kg ⁻¹]	1,14	8,68	0,34	8,20 ⁴
Pb	[mg kg ⁻¹]	3,13	0,71	1,14	
Zn	[mg kg ⁻¹]	110,52	112,09	86,41	
N_t	[%]	12,24	3,95	13,56	5,80 ³
C_{org}	[%]	46,64	50,29	50,17	
C/N		3,81	12,74	3,70	3,0-8,0 ⁴
pH-Wert		9,25	5,25	6,99	
LF	[mS cm ⁻¹]	10,20	7,50	4,60	

Laut § 4 Abs. (3) DüMV (2012) sind die hier ausgewählten Rohstoffe Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle aufgrund ihrer Nährstoffgehalte als Düngemittel und nicht mehr als Bodenhilfsstoff zu bezeichnen. Um als Bodenhilfsstoff zu gelten, darf der Gesamtstickstoffgehalt in der Trockenmasse nicht über 1,5 % liegen. Dieser Wert wird von allen drei Rohstoffen deutlich überschritten. Die Konzentrationsangaben der Nährstoffe P, Mg, K und N der Schafwollpellets stimmen nach Tab. 4 mit den Angaben des Herstellers FLORAPPELL weitestgehend überein. Laut eigener Aussagen des Herstellers werden Schafwollpellets ausschließlich aus reiner Rohwolle hergestellt. Dennoch gibt es bei den Parametern B, Ca, Fe und Mn deutliche Unterschiede zwischen den Analysen der Rohwolle und denen der Schafwollpellets. Die hohen Eisen- und Mangangehalte der Schafwollpellets können möglicherweise durch maschinellen Abrieb bei der Produktion erklärt werden. Dennoch sind die vergleichsweise hohen Kalziumgehalte auffällig, welche auch zu einem höheren pH-Wert führen. Beiden Rohstoffen gemeinsam ist ein sehr enges C/N-Verhältnis von kleiner vier, was auf eine hohe Mobilisierbarkeit des Stickstoffs schließen lässt. Im Vergleich hierzu liegt das C/N-Verhältnis bei Pferdemist bei ca. 36, bei Grünkompost bei ca. 18 (LUX und SCHMIDTKE, 2011). Problematisch können geringe C/N-Verhältnisse sein, wenn es sich aufgrund der geringen C-Gehalte um

³ Blank et al. (2011)

⁴ VAN FAASSEN (2013)

schnell mineralisierbare Materialien wie Schweinegülle handelt. In diesem Fall gehen durch Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse große Mengen an Stickstoff innerhalb kurzer Zeitspannen verloren (VAN FAASSEN, 2013). Die chemische Zusammensetzung der Rohwolle entspricht in etwa den Ergebnissen der Analysen und Recherchen von SURUCHI (2014). Aufgrund der die Wollhaare umschließenden Lanolinschicht (ZAHN et al., 1997) ist trotz des engen C/N-Verhältnisses von einer langsamen Stickstofffreisetzung bei Rohwolle auszugehen. Im Gegensatz zu Gülle und Biertreber enthalten die Schafwollpellets und die Rohwolle vergleichsweise geringe Gehalte an Phosphor. Biertreber weist im Vergleich zu Gülle hingegen deutlich geringere Kaliumgehalte auf. In Abhängigkeit der Rohstoffapplikationsmengen, der Nährstoffversorgung des Bodens und der Pflanzkulturen kann eventuell eine angepasste Ergänzungsdüngung erforderlich sein.

Weiterhin auffällig ist der sehr hohe Leitfähigkeitswert von $42,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ bei der Braunalgenart L.N., was auf eine Versalzung des Materials hindeutet, welche auch die wachstumshemmende Wirkung im Pflanzversuch mit Koriander erklären würde.

5.4 Physikalische Charakterisierung

An dieser Stelle sollten die Rohstoffe vor allem auf ihr Potential der Wasserspeicherung im Boden getestet werden. Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen wurden hier nur die in den Gewächshaus- und Freilandversuchen getesteten Rohstoffe Rohwolle, Schafwollpellets und Biertreber betrachtet.

5.4.1 Streubeutelversuche

Um Rückschlüsse auf die Zersetzung der einzelnen Rohstoffe ziehen zu können, wurden Streubeutelversuche durchgeführt. Von Interesse waren hier vor allem die Struktur und die Geschwindigkeit des Zersetzungsprozesses.

Methode

In Anlehnung an die Methode zur Bestimmung des *Tea Bag Index* (KEUSKAMP et al., 2013) wurden zur Durchführung der Versuche Teebeutel der Marke Lipton als Streubeutel verwendet. Aufgrund ihrer geringen Maschenweite konnten auch feinere Partikel der untersuchten Rohstoffe nicht herausfallen. Zudem bestehen die Teebeutel aus nicht zersetzbarem Material. Die Teebeutel wurden an einer Spitze jeweils vorsichtig aufgeschnitten, der enthaltene Tee

entfernt und das gewogene, bei 60 °C 24 h getrocknete Material der Rohstoffe eingefüllt. Von den Schafwollpellets und dem Biertreber sind jeweils 1,0 g eingewogen worden. Bei der Rohwolle war das aufgrund des hohen Volumens nicht möglich, sodass hier nur 0,5 g eingewogen worden sind. Anschließend wurden die Beutel verschlossen. Insgesamt sind je Rohstoff 10 Teebeutel vorbereitet worden. Am 31.10.2014 sind diese am Rand der Freilandversuchsfläche bei etwa 15 bis 20 cm u. GOK vergraben worden. Es war darauf zu achten, dass das Material eine möglichst große Berührungsfläche mit dem Bodensubstrat aufwies. Jeweils fünf Beutel je Variante wurden am 23.04.2015 und die verbleibenden Beutel am 03.08.2015 ausgegraben. Anschließend wurde das zersetzte Material aus den Teebeuteln entfernt, bei 60 °C 24 h getrocknet und gewogen. Es wurden jeweils der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

Ergebnisse und Diskussion

Im Ergebnis, dargestellt in Tab. 5 und Abb. 11, zeigt sich, dass insbesondere Biertreber sehr hohe Gewichtsverluste aufweist. Bereits beim ersten Termin nach sechs Monaten Verweildauer der Streubeutel im Boden sind ca. 68% der ursprünglichen Einwaage verloren gegangen. Auch optisch konnte hier bereits eine starke Zersetzung des Materials festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist die Rohwolle zu ca. 75% erhalten geblieben und auch optisch war deren Struktur noch deutlich erkennbar. Die Schafwollpellets wiesen mit nicht einmal 4,0% Verlust im Vergleich zum Ausgangsgewicht die geringste Zersetzung auf und konnten in ihrer Struktur auch noch deutlich erkannt werden. Nach weiteren vier Monaten weist die zweite noch im Boden verbliebene Charge bei den Biertrebern nur geringfügig höhere Gewichtsverluste auf als beim ersten Termin. Die optischen Eindrücke des Zersetzungszustandes waren an beiden Terminen vergleichbar. Da Biertreber bis zu 28% aus ligninhaltigen Stoffen bestehen (MATHIAS DOS SANTOS et al., 2014), lässt sich vermuten, dass vor allem diese noch nicht zersetzt wurden. Demnach ist bei den Biertrebern, mit Ausnahme der ligninhaltigen Bestandteile, auch aufgrund des engen C/N-Verhältnisses (vgl. Kap. 5.3) von einer schnellen Mineralisierung und demnach Freisetzung der Nährstoffe (insbesondere Stickstoff) auszugehen. Die Rohwolle hingegen ist noch zu knapp einem Viertel erhalten geblieben und wies eine bräunliche Verfärbung auf. Bei den Schafwollpellets beträgt der Gewichtsverlust im Vergleich zum Ausgangszeitpunkt knapp 60%. Auch hier sind deutliche Zersetzungserscheinungen erkennbar. Im Vergleich zu den Biertrebern ist der Zersetzungsprozess bei den Schafwollpellets und der Rohwolle deutlich langsamer, was auf eine kontinuierliche Freisetzung der enthaltenen Nährstoffe über längere Zeiträume hindeuten kann.

Tab. 5: Ergebnisse der Streubeutelversuche

Entnahme	Schafwollpellets	Rohwolle	Biertreber
23.04.2015	n=5	n=4	n=5
Gewicht [g] \bar{x} (σ)	0,96 (0,02)	0,38 (0,02)	0,32 (0,02)
Verlust [%]	3,69	24,79	68,13
Besonderheiten	Struktur des Ausgangsmaterials erkennbar	Struktur des Ausgangsmaterials erkennbar	Struktur des Ausgangsmaterials stark zersetzt
03.08.2015	n=4	n=3	n=2
Gewicht [g] \bar{x} (σ)	0,41 (0,03)	0,11 (0,04)	0,24 (0,04)
Verlust [%]	58,76	78,14	75,57
Besonderheiten	stark zersetzt	Struktur erkennbar	stark zersetzt

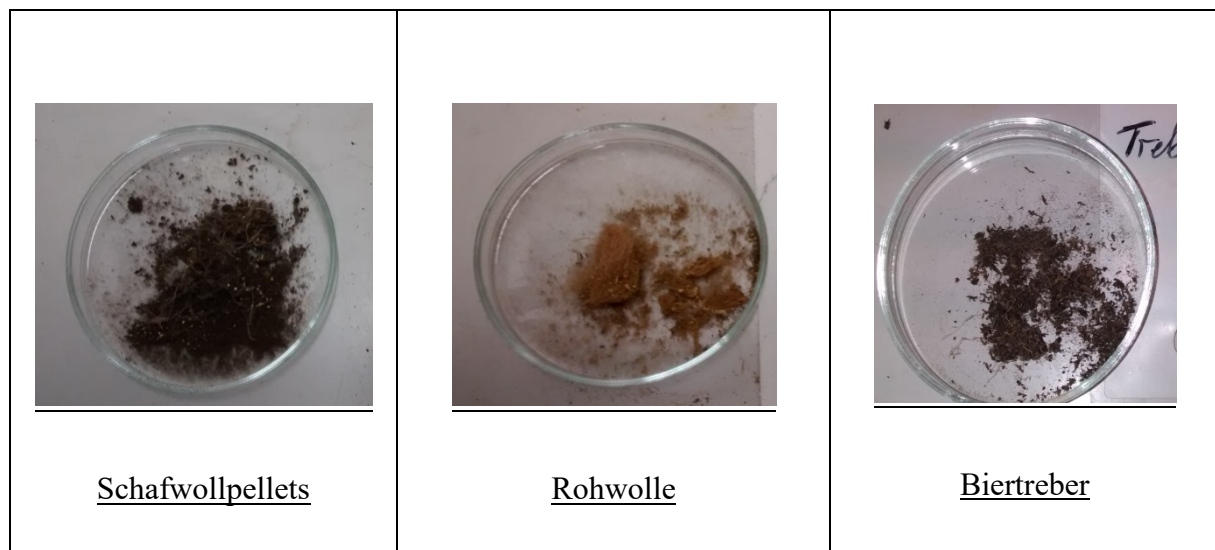


Abb. 11: Zustand der Zersetzung der einzelnen Rohstoffe am 03.08.2015, Foto: K. Garz 03.08.2015

5.4.2 REM-Aufnahmen

Durch REM-Aufnahmen sollten die Oberflächenstrukturen der Rohstoffe charakterisiert werden, um abzuschätzen inwieweit es Wasser- bzw. Bodenteilchen möglich ist, sich anzulagern bzw. aufgenommen zu werden. Von besonderem Interesse waren auch die Elementzusammensetzungen der oberflächennahen Bereiche, um Rückschlüsse auf die Nährstofffreisetzungen zu ziehen. Zudem sollten die Strukturen der zersetzten Rohstoffe der Streubeutelversuche näher charakterisiert werden.

Methoden

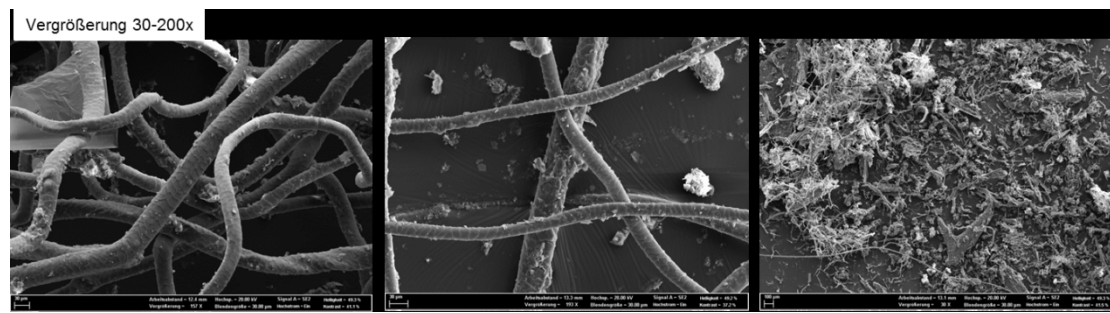
Die Aufnahmen am REM Ultra 55 Plus (Carl Zeiss SMT) waren in Kooperation mit dem GFZ Potsdam Department 4.1 Dynamik der Lithosphäre möglich. Erläuterungen zur Funktionsweise des REM und zur Probenaufbereitung finden sich auf der Homepage des GFZ Potsdam⁵. Analysiert wurden der Oberboden und das Material der Rohstoffe Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber sowie eine Vermengung der genannten Rohstoffe mit frischem Bodensubstrat. Außerdem sind die Zersetzungsprodukte der am 03.08.2015 ausgegrabenen Streubeutel untersucht worden.

Ergebnisse und Diskussion

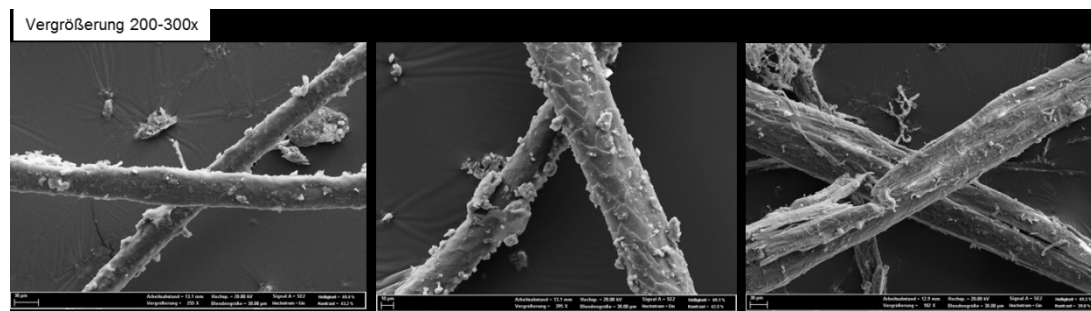
In den REM-Aufnahmen sind die Strukturen der einzelnen Rohstoffe deutlich erkennbar. Schafwollpellets bestehen im unzersetzten Zustand des frischen Materials aus einzelnen Schafwollfasern. Bodenteilchen haften hier nur bedingt. Nach einer neunmonatigen Zersetzungszeit sind kaum noch einzelne Fasern erkennbar. Die Fasern der Rohwolle lassen Anlagerungen von Lanolin (Wollwachs) erkennen, beigemengte Bodenteilchen haften hierdurch teilweise gut an. Aufgrund der Lanolinanteile lassen sich für frische Rohwolle allerdings hydrophobe Eigenschaften erwarten. Nach der Zersetzungszeit sind einzelne Fasern immer noch deutlich erkennbar, weisen aber eine veränderte Struktur auf. Die Fasern sind zum Teil aufgebrochen und anhaftendes Wollwachs ist nicht mehr erkennbar. Demnach lässt sich erwarten, dass die Fasern nach einer gewissen Verweildauer im Boden mit einhergehender Mineralisierung zunehmend aufnahmefähig für Wasser werden, wie von KADAM (2014) beschrieben. Biertreber sind von deutlich größerer und heterogenerer Struktur als Schafwollpellets oder Rohwolle. Teilweise sind einzelne Spelzen der zur Herstellung verwendeten Getreide zu erkennen. Nach neun Monaten sieht man eindeutige Zersetzungserscheinungen, wobei vermutlich die in Kap. 5.4.1 bereits erwähnten ligninhaltigen Bestandteile noch nicht mineralisiert wurden (vgl. Abb. 12).

⁵ <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/dynamik-der-lithosphaere/infrastruktur/analytik/rem/> (Stand: 08.10.2016)

Schafwollpellets



Rohwolle



Biertreber

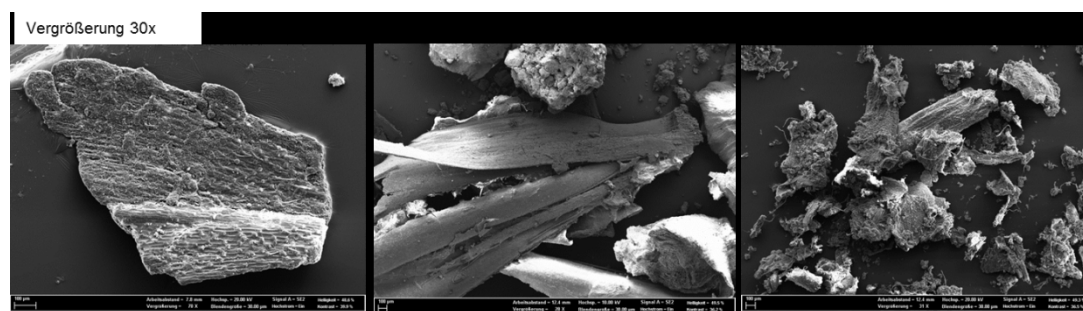


Abb. 12: REM-Aufnahmen der Rohstoffe in unterschiedlichen Zersetzungsstufen (Links=frisches Material, Mitte=frisches Material unmittelbar nach Einbringung, Rechts=zersetztes Material nach 9 Monaten im Boden)

In der im Anhang befindlichen Abbildung A 1 ist die durch das REM detektierte Elementarzusammensetzung des Oberbodens dargestellt. Wie für ein sandiges Substrat zu erwarten, liegen vor allem hohe Anteile an Silizium vor. Weiterhin lassen sich auch Nachweise für Magnesium, Kalium und Kohlenstoff erkennen, die auch in der chemischen Analyse festgestellt wurden. Für die Bestimmung der Elementarzusammensetzung der Rohwolle und der Schafwollpellets ist Kohlenstoff als Element ausgeschaltet worden, da dieser sonst zu starke Überlagerungseffekte zur Folge gehabt hätte. Die hohen Siliziumgehalte der Schafwollpellets lassen auf ein Eindringen von sandigem Substrat in die Streubeutel und damit auf eine Verunrein-

gung der Probe schließen. Dennoch sind die hohen Kalziumgehalte auffallend. Im Zusammenhang mit den chemischen Analysen und den hohen ermittelten pH-Werten der Schafwollpellets (vgl. Kap. 5.3) lässt sich vermuten, dass hier Zusätze von Kalk (CaCO_3) in das Ausgangsprodukt eingemengt wurden (vgl. Anhang A 2). In der Rohwolle zeigen sich sehr hohe Anteile an Schwefel, die aufgrund technischer Schwierigkeiten am Messgerät im Gemeinschaftslabor der Lebenswissenschaftlichen Fakultät des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der HU zu Berlin analytisch nicht ermittelt werden konnten. Zudem sind auch Elemente wie Kalium und Magnesium nach neunmonatiger Verweildauer der Rohwolle im Boden noch immer in hohen Anteilen vorhanden, was für eine langsame Zersetzung der Wollstrukturen und eine damit verbundene kontinuierliche Nährstofffreisetzung spricht (vgl. Anhang A 3). Die zersetzte Probe der Biertreber zeichnet sich durch hohe Siliziumgehalte aus, was ebenso wie bei den Schafwollpellets für eine Kontamination der Probe mit Bodensubstrat spricht. Die hohen Anteile an Kohlenstoff und Sauerstoff bestätigen die Theorie, dass vorwiegend ligninhaltige Bestandteile der Biertreber noch nicht zersetzt wurden (vgl. Anhang A 4).

5.4.3 Hydrophobizität der Rohstoffe

In Anlehnung an die „water drop penetration time method“ (DOERR, 1998) sollte die Hydrophobizität der frischen Rohstoffe überprüft werden. Ziel war es, Aussagen zur Wasseraufnahmefähigkeit der Rohstoffe zu machen.

Methode

Um vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können, musste zunächst eine Standardisierung des methodischen Ablaufes erreicht werden. Hierzu wurden die Rohstoffe so aufbereitet, wie sie auch in den Boden eingebracht werden sollten. Die Schafwollpellets wurden in ihrem Ausgangszustand untersucht, die Rohwolle wurde auf ca. 1 cm Länge geschnitten und die Biertreber aufgrund ihres hohen Feuchtigkeitsgehaltes bei 60 °C 24 h lang getrocknet. Anschließend wurden mit Hilfe einer Pipette möglichst gleichgroße Tropfen destillierten Wassers auf die Rohstoffe gegeben und die Zeit bis zu deren vollständiger Absorption durch den Rohstoff gemessen. Um bei längeren Aufnahmezeiten eine Verdunstung des Wassers zu vermeiden, wurde über der entsprechenden Probe ein Deckel als Verdunstungsschutz aufgesetzt. Insgesamt wurden je Rohstoff fünf Wiederholungen der Versuche durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Eine im Vergleich hohe Hydrophobizität weist die Rohwolle auf, wobei hier das Wollwachs, welches bereits in den Kap. 5.4.1 und 5.4.2 erwähnt wurde, eine entscheidende Rolle spielt. So benötigt ein aufgebrachter Tropfen 48 h, um von der Rohwolle absorbiert zu werden. Eine sehr gute Wasseraufnahmefähigkeit besitzen hingegen die Schafwollpellets und die Biertreber. Hier dauert es im Mittel nur 27,6 s bzw. 7,4 s mit Standardabweichungen von 4,45 s und 1,36 s bis ein Wassertropfen vollständig aufgenommen worden ist. Demnach wäre Rohwolle als extrem hydrophob, Schafwollpellets als geringfügig hydrophob und Biertreber als hydrophil zu bezeichnen (BISDOM et al., 1993).

5.4.4 Quellversuche

Als ein weiterer Indikator für die Wasseraufnahmefähigkeit der Rohstoffe wurde deren Quellpotential angesehen und untersucht.

Methode

Es wurde jeweils 1 g der wie in Kap. 5.4.3 behandelten Rohstoffe abgewogen und locker in baugleiche Messzylinder mit 20 ml Fassungsvermögen gegeben. Die Volumenausdehnung wurde zunächst im trockenen Zustand abgelesen. Anschließend wurden die Messzylinder bis zum Eichstrich der 20 ml Marke mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Ein erneutes Ablesen der Volumenausdehnung erfolgte nach 10 min, 1 h, 48 h und 72 h.

Ergebnisse und Diskussion

Eine maximale Volumenzunahme erreichten alle untersuchten Rohstoffe bereits nach 10 min. Die geringste Zunahme hat die Rohwolle mit 17% zu verzeichnen, Biertreber erhöhen ihr Volumen um bis zu 75% und Schafwollpellets weisen die höchste Zunahme mit 92% auf (vgl. Abb. 13). Demnach bestätigen sich bei diesem Versuch die in Kap. 5.4.3 erzielten Ergebnisse. Durch seine starke Hydrophobizität ist Rohwolle zunächst nicht in der Lage, größere Mengen an Wasser aufzunehmen. Ursache hierfür ist die die Fasern umlagernde Lanolinschicht. Ohne das Lanolin besteht Rohwolle aus hygroskopischen Fasern, die bis zu 33% ihres Gewichts an Wasser aufnehmen können (KORJENIC et al., 2014). Biertreber sind zwar etwas hydrophiler als Schafwollpellets, dennoch scheinen letztere trotz geringerer Wasseraufnahmefähigkeit eine deutlich größere Volumenzunahme zu erfahren. Biertreber können laut Literaturangaben bis zu 78% Wasser aufnehmen (WENZINGER, 2013), Schafwollpellets hingegen etwa 30%

(FLORAPELL, 2016). Letzteres entspricht etwa dem Wert von Rohwollfasern ohne Lanolin-schicht.

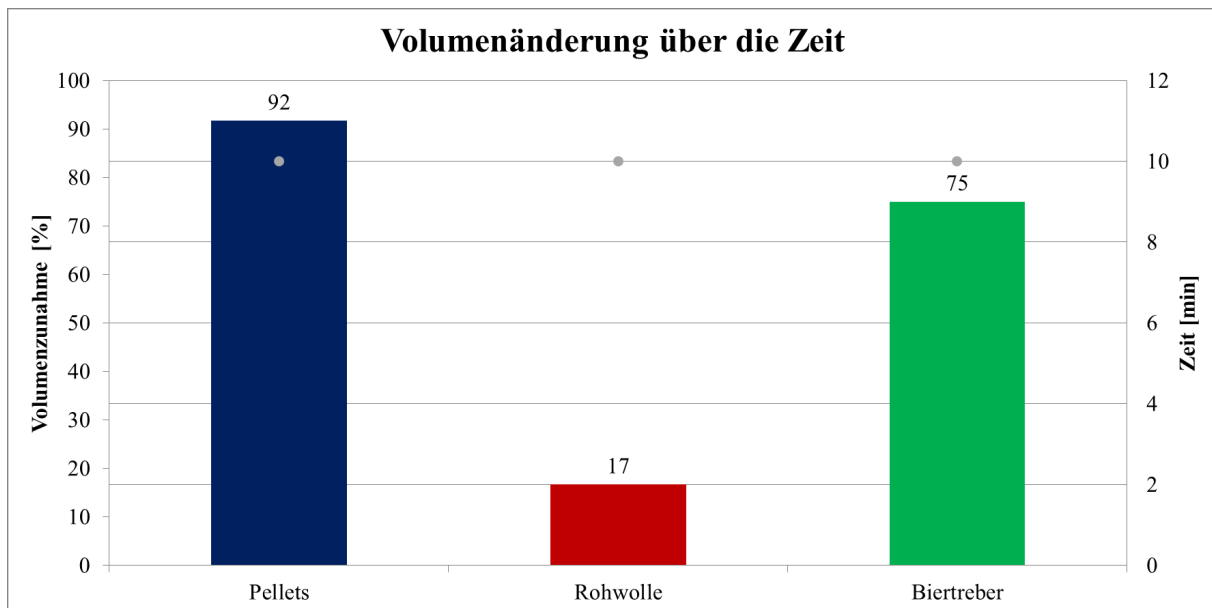


Abb. 13: Volumenänderung über die Zeit von Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber

5.4.5 Wasserretention

Durch die Vermengung des Bodensubstrats mit den Rohstoffen und die Bestimmung der Wasserretention lassen sich Aussagen über deren reales Potential die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens zu beeinflussen treffen. Aussagen zur Verteilung des Anteils wasserspeichernder Poren im Boden lassen sich durch Ermittlung der Wasserretention (pF-Funktion) treffen. Zum einen wird deren Größe und Anzahl durch die Beimengung der Rohstoffe beeinflusst und zum anderen besitzen die Rohstoffe, wie in den Kapiteln 5.4.2 bis 5.4.4 betrachtet, die grundlegende Fähigkeit, Wasser aufzunehmen und zu speichern. Um diese Beeinflussung zu charakterisieren, wurden zwei unterschiedliche Versuchsansätze durchgeführt. In Versuchsreihe 1 sollte das Potential unmittelbar nach Einarbeitung in den Boden überprüft werden, in Versuchsreihe 2 nach einer Verweildauer von ca. einem Monat der Rohstoffe im Boden. Zudem wurde in Versuchsreihe 1 die Beeinflussung der Wasserretention in Folge unterschiedlicher Aufwandmengen an eingebrachten Rohstoffen untersucht. Es sind für die Rohstoffe Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber jeweils Zugaben von 0,1 M.-%; 0,5 M.-%; und 1,0 M.-% getestet worden. In Versuchsreihe 2 sind hingegen nur die in den Wachstumsversuchen mit Koriander ermittelten Aufwandmengen von 0,1 M.-% für Rohwolle und jeweils 0,5 M.-% für Schafwollpellets und Biertreber betrachtet worden.

Methode

Für die Versuchsansätze wurden Mitscherlichgefäße mit jeweils 6 kg Substrat oder Substrat-Rohstoff-Gemisch gefüllt. Das Substrat entstammte wie in den Wachstumsversuchen mit Koriander (vgl. Kap. 5.1) dem Oberboden der Freilandversuchsfläche. Es wurde auf eine Korngröße von 1 cm gesiebt und mindestens zwei Wochen vor Verwendung luftgetrocknet. Beim Einmischen der Rohstoffe wurde darauf geachtet, dass diese im gesamten Substrat möglichst homogen verteilt waren. Nach Befüllen der Mitscherlichgefäße wurden die Substrat-Gemische in Anlehnung an die gemessene Trockenrohdichte von ca. $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ des Oberbodens (vgl. Kap.4) durch jeweils 15 Schläge mit einem Proctor verdichtet. Im Anschluss sind die Kontrolle (bestehend aus nur dem Ausgangssubstrat) und die Substrat-Gemische durch Bewässerung auf Feldkapazität gebracht worden. Um diese über einen längeren Zeitraum halten zu können, wurde ein Bewässerungssystem (BLUMAT, 2016) installiert. Hierbei wird ein Tonkegel in das Substrat gesteckt, welcher bei dessen zunehmender Austrocknung durch den entstehenden Unterdruck automatisch Wasser aus einem Vorratsbehälter zieht. Die Beprobung der Substrate wurde mit 100 cm^3 Stechzylindern durchgeführt. Die Stichprobenanzahl findet sich in Tab. 6. Nach Aufsättigung der Stechzylinderproben folgte die Bestimmung der pF-Werte mittels Sandkasten (08.27.SA), der Kaolinbank (08.02.SA) und dem Drucktopf (08.25.SA) der Firma Eijkelkamp (EIJKELKAMP, 2016).

Tab. 6: Stichprobenumfang der einzelnen Versuchsreihen zur Bestimmung der Wasserretention nach zwei Tagen und nach 32 Tagen

Versuchsreihe 1 (Messung nach 2 Tagen)			Versuchsreihe 2 (Messung nach 32 Tagen)	
Variante	Anzahl der Mitscherlichgefäße	Gesamtanzahl Stechzylinder	Anzahl der Mitscherlichgefäße	Gesamtanzahl Stechzylinder
Pellets	1	5	2	8
Rohwolle	1	5	2	8
Biertreiber	1	5	2	8
Kontrolle	1	5	2	8

Zur Bestimmung der pF-Kurven wurde der VAN-GENUCHTEN-Ansatz (VAN GENUCHTEN, 1980) genutzt. Hierbei sind die gemessenen Daten mit Hilfe des Programms RETC an den mathematischen Ansatz zur Beschreibung der Wasserspannungskurven angepasst worden (Gleichung 1). Wobei θ_ψ den Wassergehalt [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$] beschreibt, der der Wasserspannung ψ (hPa) zuzuordnen ist. θ_s stellt den Wassergehalt bei Sättigung dar. Der Restwassergehalt, der in der Regel bei einem pF-Wert von 4,2 bestimmt wird, ist durch θ_r beschrieben. Die Parameter α , n und m beschreiben den Verlauf der Wasserspannungskurve und wurden durch eine

Vielzahl von Untersuchungen empirisch bestimmt. Nach VAN-GENUCHTEN (1980) voneinander abhängig sind die Konstanten n und m (vgl. Gleichung 2), die die Steilheit der Kurve definieren. Für α werden in Abhängigkeit der Bodenart Werte zwischen 0,005 bis 0,035 und für n Werte zwischen 1,5 und 4,5 jeweils für tonige bis sandige Böden angegeben.

$$(1) \quad \theta_{\Psi} = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \Psi)^n]^m}$$

$$(2) \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

Ergebnisse und Diskussion

Von besonderem Interesse bei der Auswertung der Wasserspannungskurven ist der Bereich der nFK zwischen pF 1,8 bis pF 4,2. Dieser Bereich bezieht sich auf die Porengrößen zwischen 50 μm bis >10 μm (enge Grobporen) und 10 μm bis 0,2 μm (Mittelporen). Das hier enthaltene Bodenwasser ist pflanzenverfügbar (BODENSYSTEMATIK, 2005).

Tab. 7: Kennwerte zur Wasserretention Versuchsreihe 1 (Messung 2 Tage nach Versuchsansatz)

Variante [M.-%]	GePV	Wassergehalt in Volumen-%							TRD
		weite GP	enge GP	MP	FP	LK	nFK	FK	
	[Vol-%]	pF 0-1,8	pF 1,8-2,5	pF 2,5-4,2	pF >4,2	pF < 1,8	pF 1,8-4,2	pF >1,8	[g cm ⁻³]
P 0,1	49,97	19,88	8,42	16,68	5,00	19,88	25,09	30,09	1,41
P 0,5	51,76	23,07	5,48	17,09	6,12	23,07	22,56	28,68	1,38
P 1	51,58	23,23	6,10	8,52	13,73	23,23	14,62	28,35	1,35
W 0,1	50,30	22,06	8,68	12,72	6,84	22,06	21,40	28,24	1,32
W 0,5	53,43	29,31	3,92	15,72	4,48	29,31	19,64	24,12	1,16
W 1	55,29	29,55	3,09	18,62	4,03	29,55	21,71	25,74	0,97
T 0,1	48,82	18,82	8,40	10,53	11,07	18,82	18,93	30,00	1,43
T 0,5	50,06	19,43	8,42	13,75	8,46	19,43	22,17	30,63	1,40
T 1	49,85	17,32	8,99	15,04	8,50	17,32	24,03	32,53	1,37
Kontrolle	50,07	20,25	11,82	12,00	6,00	20,25	23,82	29,82	1,41

Tab. 8: Kennwerte zur Wasserretention Versuchsreihe 2 (Messung 32 Tage nach Versuchsansatz)

Variante [M.-%]	GePV	Wassergehalt in Volumen-%							TRD
		weite GP	enge GP	MP	FP	LK	nFK	FK	
	[Vol-%]	pF 0-1,8	pF 1,8-2,5	pF 2,5-4,2	pF >4,2	pF < 1,8	pF 1,8-4,2	pF >1,8	[g cm ⁻³]
P 0,5	42,48	7,13	4,44	23,29	7,61	7,13	27,74	35,35	1,48
W 0,1	41,13	6,34	6,99	19,68	8,11	6,34	26,67	34,78	1,53
T 0,5	41,29	6,54	4,59	22,86	7,30	6,54	27,45	34,75	1,49
Kontrolle	42,48	6,68	8,61	18,84	8,35	6,68	27,45	35,80	1,49

Der Verlauf der pF-Kurven für die Kontrollgruppen in Abb. 14 bis Abb. 17 entspricht in Abhängigkeit der ermittelten Bodenart Sl2 (vgl. Kap. 4) erwartungsgemäß etwa dem zwischen einem Schluff- und einem Sandboden (SCHEFFER et al., 2013). Durch die Zugabe der Rohstoffe und deren Verweildauer im Ausgangssubstrat kam es zu Abweichungen der genannten Erwartungshaltung. Nach einer nur kurzen Verweildauer von zwei Tagen der Rohwolle im Bodensubstrat in der Versuchsreihe 1 zeigte sich, dass die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens mit zunehmender Konzentration an Rohwolle absinkt (vgl. Abb. 14 bis Abb. 16).

In Tab. 7 ist zu erkennen, dass die Trockenrohdichten mit zunehmendem Anteil an Rohwolle ebenfalls stark abnehmen und das Gesamtporenvolumen (GePV) zunimmt. Insbesondere der Anteil der weiten Grobporen, in denen sich das schnell bewegliche Sickerwasser befindet und die gleichzusetzen sind mit der Luftkapazität (LK), ist im Vergleich zur Kontrolle deutlich höher. Ursächlich hierfür ist vor allem die faserige Struktur der Rohwolle. Zunächst ist es den Bodenteilchen nicht möglich, sich in alle entstehenden Hohlräume auch zwischen den einzelnen Fasern einzulagern. Nach einer Verweildauer von 32 Tagen im Substrat lässt sich hingegen eine deutlich kompaktere Lagerung nachweisen. So ist die Trockenrohdichte mit 1,53 g cm⁻³ sogar etwas höher als bei der Kontrolle mit 1,49 g cm⁻³. Insbesondere im Bereich der Mittelporen bis zu den Feinporen konnten hohe Wassergehalte nachgewiesen werden, sodass im Vergleich zur Kontrolle von einer Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit im Bereich der nFK durch Rohwolle nach längerer Verweildauer im Boden auszugehen ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch (KADAM et al., 2014) nach Einarbeitung von u. a. Wollmatten in den Boden und anschließend durchgeführten Bodenfeuchtemessungen.

Bei den Schafwollpellets zeigte sich, dass im Bereich der nFK sowohl in Versuchsreihe 1 als auch in Versuchsreihe 2 ähnliche Wassergehalte nachgewiesen werden konnten wie bei den Kontrollen. Je höher der Anteil an Schafwollpellets im Substrat, desto mehr Wasser wurde in Versuchsreihe 1 im Bereich der Feinporen als sogenanntes nicht pflanzenverfügbares Totwasser gespeichert (vgl. Abb. 14 bis Abb. 17 sowie Tab. 7 und Tab. 8). Dennoch sind die Schaf-

wollpellets in der Lage, sehr viel Wasser aufzunehmen. Allerdings kommt es während dieses Prozesses zu einer sehr starken Volumenvergrößerung (vgl. Kap. 5.4.4), sodass umliegendes Bodenmaterial stark aufgelockert wird und ein hoher Anteil an weiten Grobporen entsteht. Das führt außerdem zu einem Rückgang der Trockenrohdichten (vgl. Tab. 7). Demnach kann nach Einmischung der Schafwollpellets das Substrat zunächst weniger Wasser speichern und die Schafwollpellets binden das aufgenommene Wasser teilweise über den permanenten Welkepunkt (PWP) von $pF > 4,2$ hinaus. Versuchsreihe 2 zeigt, dass nach einer Verweildauer von 32 Tagen die höchsten Wassergehalte bei einer Aufwandmenge von 0,5 M.-% in den Bereichen der Mittelporen vorhanden sind, so dass dieses Wasser pflanzenverfügbar ist. Demnach konnten für die Wasserspeicherfähigkeit der Schafwollpellets ähnliche Ergebnisse wie für die Rohwolle nachgewiesen werden.

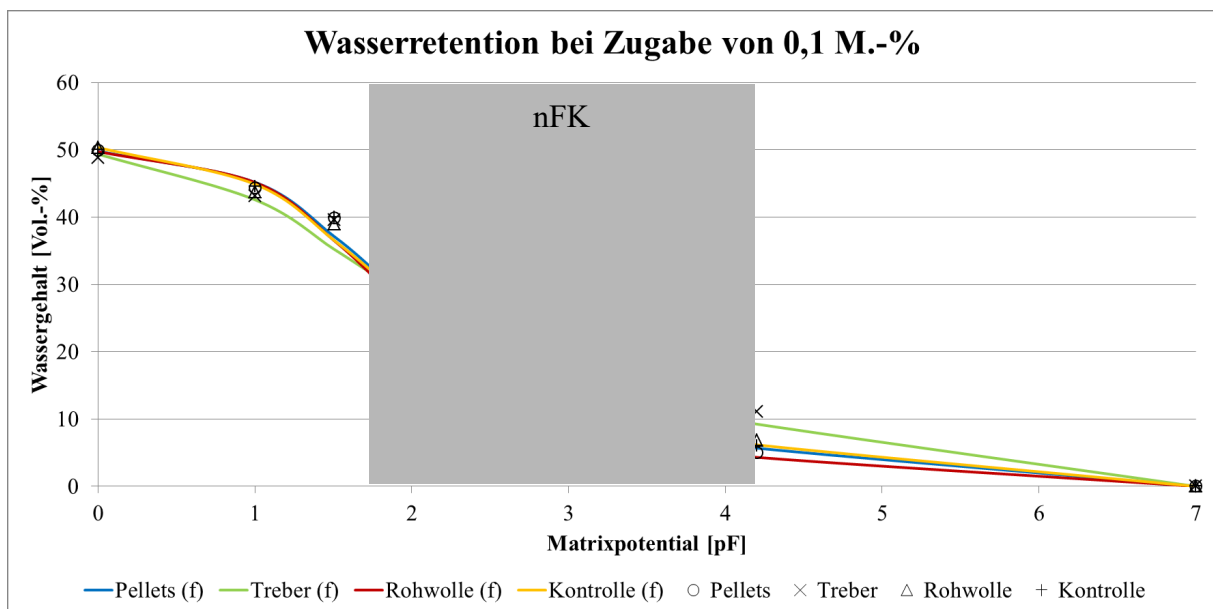


Abb. 14: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 0,1 M.-%; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte

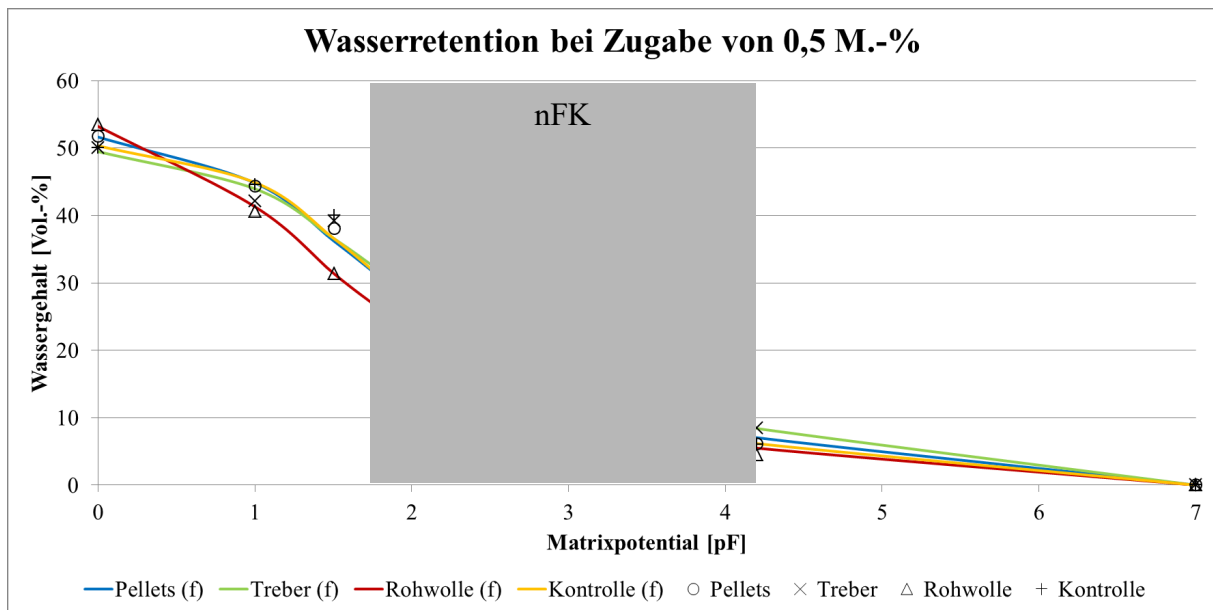


Abb. 15: **Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 0,5 M.-%;**
gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte

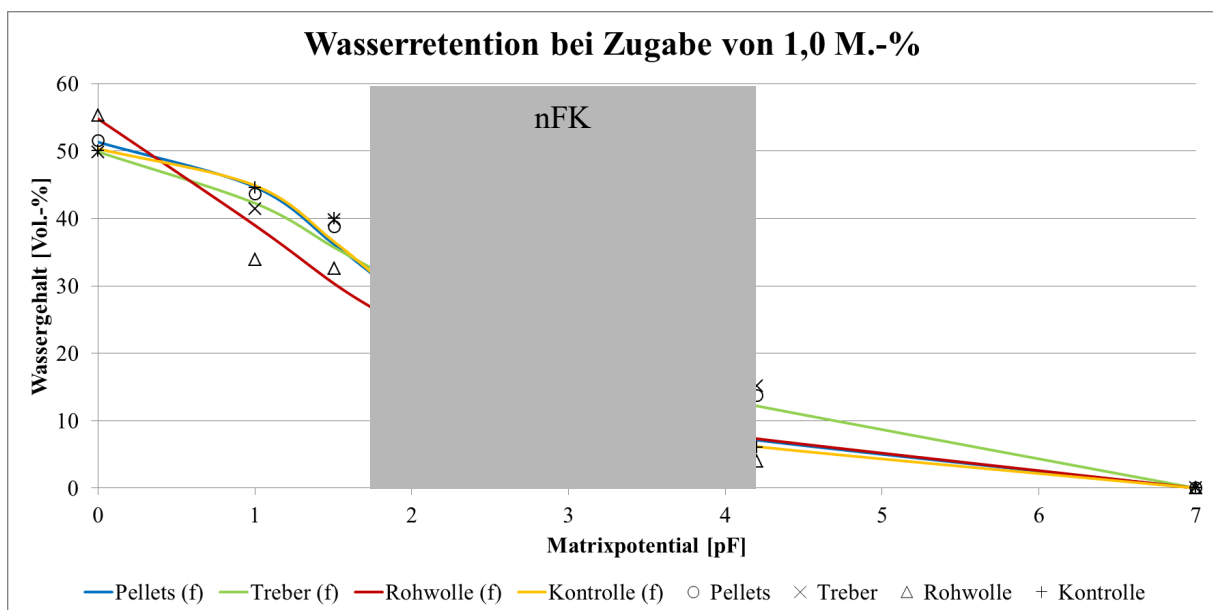


Abb. 16: **Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 1 mit Konzentrationen von jeweils 1,0 M.-%;**
gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte

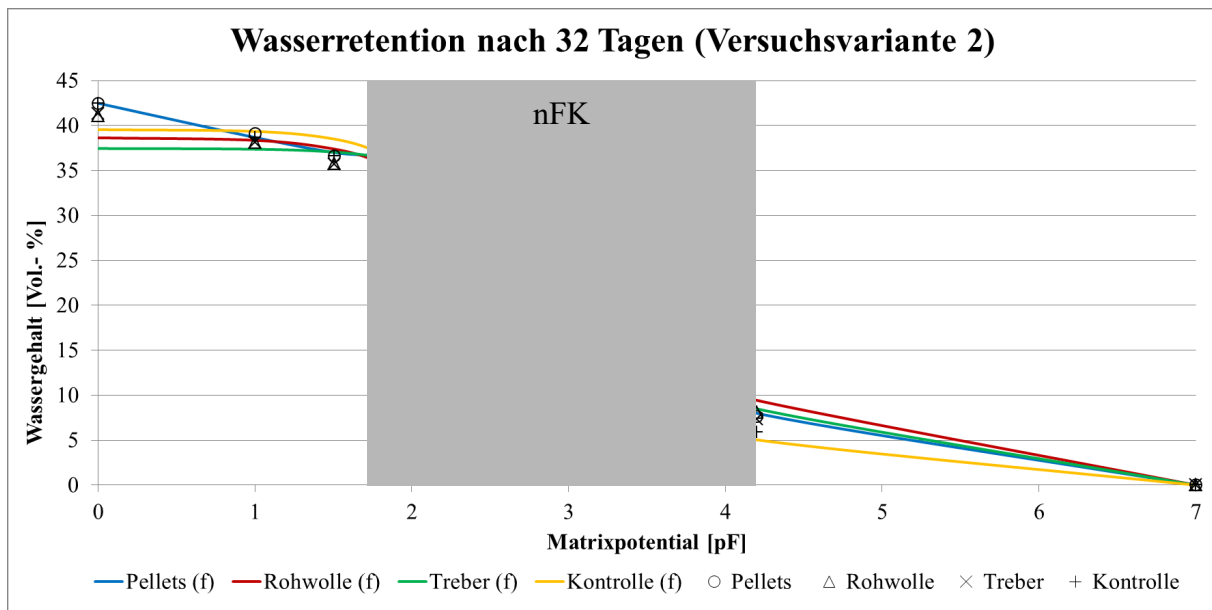


Abb. 17: Wasserspannungskurven der Versuchsreihe 2 nach 32 Tagen im Substrat mit Konzentrationen von 0,5 M.-% Schafwollpellets und Biertreber sowie 0,1 M.-% Rohwolle; gefittete Kurven (f) und Originalmesswerte

Biertreber lassen sich aufgrund der ähnlichen Korngrößen homogener in das Bodensubstrat einmischen. Aufgrund ihrer Fähigkeit Wasser aufzunehmen (vgl. Kap. 5.4.4), kann bei Aufwandmengen von 0,5 M.-% bereits in Versuchsreihe 1 ein höherer Wassergehalt im Bereich der Mittelporen als bei der Kontrolle festgestellt werden (vgl. Abb. 14 bis Abb. 17 sowie Tab. 7 und Tab. 8). Versuchsreihe 2 bestätigt die Ergebnisse von Versuchsreihe 1. Demnach hat bei Biertrebern eine Verweildauer von ca. einem Monat im Vergleich zur Kontrolle keinen weiteren positiven oder negativen Einfluss auf die Wasserretention (vgl. Abb. 17 und Tab. 8).

5.5 Zwischenfazit Themenkomplex 1 (Vorversuche)

Anhand der durchgeführten Untersuchungen ist es möglich, die Rohstoffe auf deren Eignung als Bodenverbesserungsmittel im sandigen Substrat einzuschätzen. Im Fokus lag deren Potential, den Boden in seinen Eigenschaften so zu verändern, dass nachweislich positive Effekte auf das Pflanzenwachstum festgestellt werden können. Die Braunalgen L.N. und L.T. erwiesen sich als ungeeignet, da sie in ein sandiges Ausgangssubstrat eingebracht negative Effekte auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen hatten. Aufgrund sehr hoher Leitfähigkeitswerte bei den L.N. lässt sich vermuten, dass das Material stark durch Meersalze kontaminiert war und somit in höheren Konzentrationen toxisch auf die Versuchspflanzen gewirkt hat. Diese Versalzung wurde bei der L.T. nicht festgestellt. Dennoch sind auch bei den L.T. im Vergleich zur Kontrolle geringere gemessene Werte des Längenwachstums und der Chlorophyllgehalte festgestellt worden. Vor allem die mit der Kontrolle vergleichbaren Chlorophyllgehalte deuten bei den Braunalgen L.N. und L.T. auf eine schlechte Nährstoffverfügbarkeit unabhängig von den eingebrachten Konzentrationen hin. Ähnliches gilt auch für die Varianten des Hornkrauts und der Wasserpflanzen, wobei es hier mit zunehmender Konzentration der Rohstoffe zu einem geringfügigen Anstieg der Chlorophyllgehalte kam, die sich aber kaum von den Kontrollen unterschieden. Auch durch das Alginat wurden keine besseren Wuchserfolge als bei den Kontrollen erzielt. Durch eine ausgebildete Kruste wurde bereits das Aufkeimen der Pflanzen erschwert, und nachfolgend ist auch eine Durchfeuchtung des Substrates kaum möglich gewesen. Aus den genannten Gründen wiesen alle Varianten der Braunalgen L.N. und L.T., des Alginats, des Hornkrauts und der Wasserpflanzen kaum höhere und teilweise deutlich geringere Trockenmasseerträge auf als die vergleichbaren Kontrollen. Daher wurden diese Rohstoffe als ungeeignet angesehen, den Boden in seinen Eigenschaften so zu beeinflussen, dass diese sich positiv auf das Wachstum von Pflanzen auswirken können. Wesentlich bessere Chlorophyllgehalte, ein höheres Längenwachstum und infolgedessen auch höhere Trockenmasseerträge wiesen die Varianten der Schafwollpellets, der Biertreber und der Rohwolle auf. Aufgrund der Ergebnisse der Wachstumsversuche und unter Beachtung realistischer Aufwandmengen auch für großräumige Einsatzzwecke, sind Konzentrationen von 0,5 M.-% für die Schafwollpellets und die Biertreber und 0,1 M.-% für die Rohwolle am geeignetsten. Die Nährstoffanalysen der genannten Rohstoffe zeigen, dass diese in den Boden eingebracht für eine bessere Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen sorgen können. Insbesondere das enge C/N-Verhältnis der Schafwollpellets und der Rohwolle weist auf eine gute Versorgung mit Stickstoff hin. Allerdings sind in beiden Rohstoffen nur geringe Gehalte an

Phosphor vorhanden. Aufgrund der Struktur der einzelnen Fasern beider Rohstoffe ist aber von einer langsamen Mineralisierung des Materials auszugehen, was auch durch die Streubeutelversuche bestätigt werden konnte. Biertreber weisen ebenfalls ein vergleichsweise enges C/N-Verhältnis mit hohen Stickstoffgehalten auf. Allerdings sind diese, wie in den Streubeutelversuchen nachgewiesen, mit Ausnahme der holzigen Bestandteile schnell mineralisierbar, sodass enthaltene Nährstoffe nur über kurze Zeiträume zur Verfügung gestellt werden können. Zudem enthalten Biertreber nur vergleichsweise geringe Mengen an Kalium. Alle Rohstoffe sind nach geltendem Recht wegen der enthaltenen Nährstoffmengen als Düngemittel zu bezeichnen. Aufgrund der geringen Gehalte bestimmter Nährstoffe in den Rohstoffen sollte bei deren Einsatz als Düngemittel eine an die Pflanzkultur und die Bodenstruktur angepasste zusätzliche Bedarfsdüngung erfolgen. Bei Einbringung der Rohstoffe in den Boden werden aber auch dessen physikalische Eigenschaften verändert. So führt das Einarbeiten von trockenen Schafwollpellets mit anschließender Befeuchtung durch die einsetzenden Quellungsprozesse zu einer Auflockerung des Substrats. In geringerem Umfang lässt sich das im Ergebnis der Quellversuche auch für die Biertreber bestätigen. Weiterhin besitzen die Rohstoffe das Potential, die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens im Bereich der nFK zu verbessern. D. h., der Wassergehalt im pflanzenverfügbaren Bereich wird erhöht. Einschränkend ist jedoch zu sagen, dass frisch eingearbeitete Rohwolle zunächst einen negativen Effekt auf die Wasserspeicherfähigkeit hat. Erst mit einer längeren Verweildauer im Boden wird das hydrophob wirkende Lanolin abgebaut und die Fasern aufgebrochen, sodass das Wasser gespeichert werden kann. Auch die Schafwollpellets bewirken aufgrund der Bodenauflockerung und der dadurch entstehenden weiten Grobporen in Folge der Quellung zunächst eine Verschlechterung der Wasserspeicherfähigkeit. Zudem binden diese zunächst Wasser im nicht pflanzenverfügbaren Bereich ($pF > 4,2$). Bei entsprechender Verweildauer und Vorbefeuchtung des Materials zeigt sich aber auch hier eine Erhöhung des Wassergehaltes (Vol.-%) im Bereich der nutzbaren Feldkapazität. Biertreber sind hingegen unmittelbar nach Einarbeitung in der Lage, Wasser im pflanzenverfügbaren Bereich zu speichern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rohstoffe Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber das Potential haben, in sandigem Substrat sowohl die Verfügbarkeit an Nährstoffen zu verbessern als auch die Wasserspeicherfähigkeit im Bereich der nFK des Bodens zu erhöhen.

6. Themenkomplex 2: Gewächshausversuche

6.1 Einleitung

Gewächshausversuche ermöglichen Pflanzversuche unter kontrollierten Umgebungsbedingungen. Dadurch können Effekte identifiziert und in ihrer Wirkungsweise und -stärke beschrieben werden. Diese können durch die Veränderung einzelner Parameter wie z. B. der Zusammensetzung des genutzten Ausgangssubstrates entstehen. Ausgehend von den Ergebnissen aus Themenkomplex 1 lassen sich bei Zugabe von Rohwolle, Schafwollpellets und Biertrebern in ein sandiges Ausgangssubstrat veränderte bodenphysikalische Eigenschaften in Bezug auf die Wasserspeicherfähigkeit erwarten. Außerdem wurde erwartet, dass durch Mineralisierungsprozesse pflanzenverfügbare Nährstoffe freigesetzt werden können. Daher sind die Auswirkungen dieser Beeinflussungen in Bezug auf pflanzenbauliche Parameter wie Wachstum, Entwicklung und Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen wie Mais (*Zea mays*) und Weichweizen (*Triticum aestivum* L.) untersucht worden. Ausgewählt wurden diese Arten wegen ihrer wirtschaftlichen Bedeutung sowie aufgrund ihrer als C₄- bzw. C₃-Pflanzen unterschiedlichen Physiologie und den daraus folgenden Ansprüchen an den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens (vgl. Kap. 2). Von besonderem Interesse war in diesem Zusammenhang die Auswirkung von Wassermangelbedingungen (WMB) auf die erhobenen pflanzenbaulichen Parameter.

6.2 Material und Methoden

Für die Versuche konnte die Experimentalkabine C5b des Forschungsgewächshauses der Humboldt-Universität zu Berlin genutzt werden. Diese befindet sich in südlich exponierter Lage. Durch das eingesetzte Messsystem des Kooperationspartners Yara ZIM Plant Technology konnte über Temperatur-, Strahlungs- und Luftfeuchtesensoren eine minutengenaue Messung dieser Parameter innerhalb der Kabine erfolgen. Insgesamt waren je Versuchsreihe zwei Strahlungsmessgeräte (Global Light-Sensor), zwei Luftfeuchtesensoren (Humidity Sensor) und zwei Temperatursensoren (Temperature-Sensor) installiert⁶.

⁶ <http://yara.zim-plant-technology.com/?Components> (Stand: 27.10.2016)

Tab. 9: Versuchsreihen der Gewächshausversuche mit den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten

VR	Pflanzenart (Sorte)	WMB nach Tagen (BBCH-Stadium)	Anzahl der Mitscherlichgefäße	Getestete Rohstoffe (Varianten)	Untersuchungsschwerpunkte	Zeitraum
1	Mais (Lucas)	73 (67)	60	Schafwollpellets, Biertreber, Rohwolle	1. Vergleich gute Bewässerung und WMB (C ₄ -Pflanze) 2. Ertragsunterschiede in Quantität und Qualität (Stroh und Korn)	05.2014 bis 08.2014
2	Sommerweizen (KWS Chamsin)	56 (61)	60	Schafwollpellets, Biertreber, Rohwolle	1. Vergleich gute Bewässerung und WMB (C ₃ -Pflanze) 2. Vergleichbarkeit zu Freilandversuchen 3. Ertragsunterschiede in der Quantität (Stroh)	09.2014 bis 12.2014
3	Mais (Lucas)	32 (32)	40	NPK Dünger, Biertreber, Rohwolle	1. Vergleich gute Bewässerung und WMB (C ₄ -Pflanze) 2. Vergleich mit konventioneller NPK-Düngung 3. Ertragsunterschiede in Quantität und Qualität (Stroh)	05.2015 bis 07.2015

Insgesamt wurden drei Versuchsreihen (VR) mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten im Gewächshaus durchgeführt (vgl. Tab. 9).

6.2.1 Versuchsaufbau

Die Herstellung der Substrat-Rohstoffgemische erfolgte für alle Versuchsvarianten gleich. Zunächst wurden die ermittelten Mengenanteile (aus Kap. 5.2.6) mit dem sandigen Substrat, welches bereits für die Versuche aus Themenkomplex 1 genutzt wurde, vermengt. Für die Versuche wurden Mitscherlichgefäße genutzt, die mit insgesamt 6 kg Substrat oder Substrat-Rohstoffgemisch befüllt und anschließend mit 15 Proctorschlägen definiert verdichtet wurden (vgl. Kap. 5.4.5). Die jeweiligen Mengen sind in Tab. 10 dargestellt. Als Kontrollgruppe diente je Versuchsreihe jeweils das reine Substrat ohne Zugaben der Rohstoffe.

Tab. 10: Mengen der jeweiligen Rohstoffe für die Gewächshausversuche pro Gefäß

Rohstoff/Variante [M.-%]	Menge
Kontrolle	Keine Beimengungen
Rohwolle 0,1	6 g
Schafwollpellets 0,5	30 g
Biertreber 0,5	30 g
NPK Dünger	23,01 ml
0,5 M $Ca(NO_3)_2$	5,36 ml
0,5 M $MgSO_4$	8,30 ml
0,5 M KH_2PO_4	3,30 ml
0,5 M K_2SO_4	6,05 ml

Die Gefäße wurden in jeder Versuchsreihe randomisiert in zwei Reihen aufgestellt (vgl. Abb. 18). Pro Variante wurden in Versuchsreihe 1 und 2 je 15 Mitscherlichgefäße und in Versuchsreihe 3 je 10 Mitscherlichgefäße vorbereitet. In diese wurden anschließend je Gefäß drei Samen gesetzt, die zuvor in abgedunkelter und belüfteter Umgebung in $CaSO_4$ eingeweicht worden sind. Nach dem Aufkeimen der Pflanzen wurde das vitalste Individuum im Gefäß belassen und die verbleibenden zwei durch mehrmaliges Kürzen bis zu deren Absterben am Wachstum über das Dreiblattstadium hinaus gehindert.

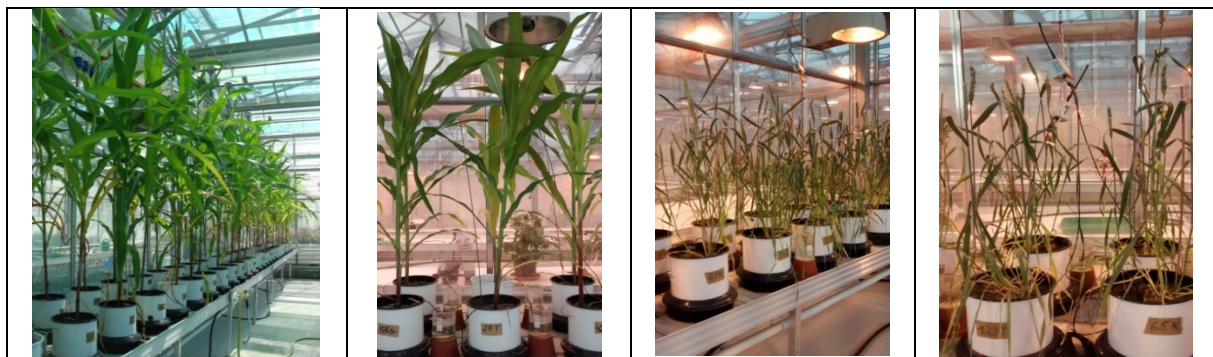


Abb. 18: Exemplarische Fotos des Versuchsaufbaus (VR 1 und 2) (K. Garz 25.06.2014)

Nach der in Tab. 9 genannten Anzahl an Tagen wurden in Versuchsreihe 1 und 2 in je sieben Gefäßen und in Versuchsreihe 3 in je fünf Gefäßen Wassermangelbedingungen induziert. Die Bewässerung erfolgte wie in Kap. 5.4.5 beschrieben über das Blumatssystem (BLUMAT, 2016). Um Wassermangelbedingungen zu erzeugen, wurden die Bewässerungskegel aus den entsprechenden Gefäßen entfernt und diese anschließend händisch nach Bedarf gewässert. Die Bewässerungsmenge wurde sowohl bei den über das Blumatssystem als auch bei den händisch bewässerten Gefäßen dokumentiert. Ziel der händischen Bewässerung war es, eindeutige Trockenstresserscheinungen wie ein Einrollen der Blätter zu erreichen, den Pflanzen aber so viel Wasser zu geben, dass diese nicht absterben konnten.

6.2.2 Bonitur

Längenwachstum

Gemessen wurde jeweils bis zur Spitze des längsten Blattes und nach Entwicklung des Blütenstandes bis zu dessen maximaler vertikaler Ausdehnung. Die Messungen erfolgten in Phasen großer Wachstumsschübe teilweise täglich und ansonsten zwei- bis dreimal wöchentlich. Nach Ausbildung der Blütenstände wurden die Messungen des Längenwachstums eingestellt, da eine weitere Längenzunahme ab diesem Zeitpunkt nicht mehr zu erwarten war.

Entwicklungsstand

Für die Bestimmung der Entwicklungsstände der einzelnen Individuen wurde die BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Mais (*Zea mays L.*) bzw. Getreide (hier *Weizen = Triticum sp. L.*) (WEBER und BLEIHOLDER, 1990) genutzt.

Chlorophyllgehalt

Die Bestimmung der Chlorophyllgehalte erfolgte wie in den Wachstumsversuchen mit Koriander. Eine nähere Erläuterung findet sich in Kap. 5.2.4.

6.2.3 Turgor und Bodenfeuchte

Der Turgor einer Pflanze ist verantwortlich für das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen (Stomata). Er ist u. a. abhängig von der Temperatur, der Tageszeit sowie der Wasser- und Nährstoffversorgung, wobei hier insbesondere Kalium eine wichtige Rolle spielt (RIBOLDI et al., 2016). Sowohl der Turgor an ausgewählten Einzelpflanzen als auch die Bodenfeuchte in den entsprechenden Gefäßen wurden mit Hilfe der Sensortechnik des Kooperationspartners Yara ZIM Plant Technology gemessen. Die Messungen des Turgors erfolgten über den Yara Water-Sensor. Hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise geringfügig invasive Methode. Es werden Echtzeitmessungen der Änderungen des Turgors vorgenommen. Hierzu wird das Blatt, wie in Abb. 19 dargestellt, vorsichtig und zerstörungsfrei zwischen einen Magneten (P_{clamp}) und einen Gegenmagneten (P_{clamp}) geklemmt. Im Gegenmagneten befindet sich ein Drucksensor, welcher die relativen Änderungen des Blattinnendrucks (P_c) indirekt über die Krafteinwirkung des Magneten messen kann. Die Datenausgabe (vgl. Abb. 19) erfolgt in P_p [kPa] und zeigt ein inverses Bild zum tatsächlichen Turgor des geklemmten Blattes. Demnach

wird bei hohem Turgorwert, wie in den Abend- und Nachtstunden, ein geringer und bei niedrigem Turgorwert, wie in den Mittagsstunden, ein hoher gemessener Druckwert ausgegeben.

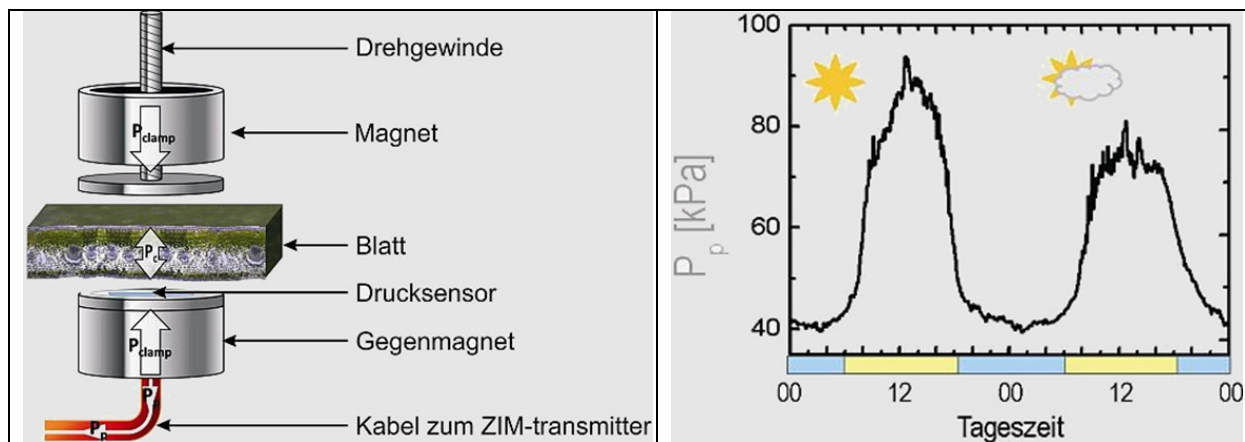


Abb. 19: Messprinzip des Yara Water-Sensors mit einer schematischen Darstellung der Datenausgabe⁷

In Versuchsreihe 1 wurde an das Fahnenblatt ausgewählter Pflanzen je ein Yara Water-Sensor geklemmt. Bei der dritten Versuchsreihe wurde an den ausgewählten Versuchspflanzen bereits das vierte vollständig entwickelte Blatt mit je einem Sensor versehen. Insgesamt sind in jeder Versuchsreihe für jede Versuchsvariante die Daten mindestens einer repräsentativen Versuchspflanze mit guter Wasserversorgung und die mindestens einer unter Wassermangelbedingungen stehenden repräsentativen Versuchspflanze ausgewertet worden.

Zur Messung der Bodenfeuchte waren Bodenfeuchtesensoren (Soil Moisture-Sensor) des Typs Water scout SM100 installiert. Hierbei wurde der volumetrische Wassergehalt (VWC) in minutengenauer Auflösung gemessen. In Versuchsreihe 1 und 3 waren in allen Gefäßen, bei denen die Pflanzen mit einem Yara Water-Sensor versehen waren, auch Bodenfeuchtesensoren installiert. Die Gesamtzahl der ausgewerteten Sensoren der einzelnen Versuchsreihen ist in Tab. 11 dargestellt.

Tab. 11: Anzahl der eingesetzten Yara ZIM-Sensoren in den Versuchsreihen

Versuchsreihe	Water-Sensor	Bodenfeuchte-sensor	Luftfeuchte-sensor	Temperatur-sensor	Strahlungs-sensor
1	10	10	2	2	2
3	15	15	2	2	2

⁷ <http://yara.zim-plant-technology.com/de/?Technologie:Messprinzip> (Stand: 10.02.2016)

Um die ausgegebenen Messwerte des Turgors vergleichbar zu machen, mussten diese zunächst normalisiert werden. Hierzu wurden die Turgorwerte in Tageswerte zwischen 08:00 Uhr und 20:00 Uhr und Nachtwerte zwischen 20:00 Uhr und 08:00 Uhr getrennt. Anschließend sind die Tages- bzw. Nachtwerte auf ein Datum nach Induzierung des Trockenstresses normalisiert und auf einen Tageswert gemittelt (arithmetisches Mittel) worden. Bedingung für den Startpunkt der Normalisierung war es, dass Turgorwerte mindestens zwei Tage zuvor plausible Werte besaßen. Durch Fehler beim Klemmen der Sensoren oder starkes Pflanzenwachstum können unplausible Werte entstehen, die beispielsweise inverse Verläufe aufweisen. In diesem Fall wurden die Sensoren neu gesetzt und die Werte erneut mindestens zwei Tage auf Plausibilität kontrolliert. Beginn und Ende der zur Auswertung genutzten normalisierten Messwerte finden sich im Anhang in Tab. A 5. Die Auswertung der Datensätze erfolgte mit der Statistiksoftware R (3.2.2) und wird in Kap. 6.2.5 näher erläutert. Ebenfalls mit R (3.2.2) erstellt wurden Boxplots (BEHR und PÖTTER, 2014), die zur Darstellung der Bodenfeuchte- und Turgordaten dienen. Hierzu sind die aufbereiteten Datensätze der Tageswerte der Bodenfeuchte- und Turgordaten genutzt worden.

6.2.4 Ernte und Ernteaufbereitung

Aufgrund der Umgebungsbedingungen erfolgte die Ernte der Versuchspflanzen bei den Versuchsreihen zu unterschiedlichen Stadien der Entwicklung. In Versuchsreihe 1 waren die Pflanzen nach BBCH-Codierung mehrheitlich komplett ausgereift. Annähernd war das auch in Versuchsreihe 2 der Fall. Um einen Verlust der Körner durch Ausfallen zu vermeiden, wurde hier bereits im BBCH-Stadium 97 geerntet. Einzig in Versuchsreihe 3 war ein Ausreifen der Pflanzen nicht möglich, da in der Gewächshauskabine aufgrund der äußeren Bedingungen über mehrere Tage Temperaturen von $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen wurden und die Pflanzen bereits deutliche Anzeichen von Hitzeschäden aufwiesen. Um ein Absterben zu verhindern, wurde dieser Versuch bei einem durchschnittlichen BBCH-Stadium der Pflanzen von 34 abgebrochen (vgl. Tab. 12).

Tab. 12: Tag der Ernte und durchschnittliches BBCH-Stadium der geernteten Pflanzen je Versuchsreihe

Versuchsreihe	Versuchspflanze (Sorte)	Tag der Ernte	Ø BBCH-Stadium
1	Mais (Lucas)	20.08.2014	99
2	Sommerweizen (KWS Chamsin)	15.12.2014	97
3	Mais (Lucas)	02.07.2015	34

Eine Auflistung der in den jeweiligen Versuchsreihen an der oberirdischen Biomasse erhobenen Parameter findet sich in Tab. 13.

Tab. 13: Auflistung der in den Versuchsreihen (VR) erhobenen Ernteparameter der oberirdischen Biomasse

Parameter	VR 1	VR 2	VR 3
Frischmasse Stroh [g] Ø	Ja	Ja	Ja
Trockenmasse Stroh [g] Ø	Ja	Ja	Ja
Kolben/Ähren Gewicht [g] Ø	Ja	Ja	Nein
Kolben Anzahl Ø	Ja	Nein	Nein
Kolben Länge Ø	Ja	Nein	Nein
Tausendkorngewicht [g]	Ja	Nein	Nein
Frischmasse Korn [g]	Ja	Nein	Nein
Trockenmasse Korn [g]	Ja	Nein	Nein
Nährstoffgehalte Stroh	C/N, Rp	C/N, Rp, P, Mg, Ca, K	C/N, Rp, P, Mg, Ca, K
Nährstoffgehalte Korn	C/N, Rp	Nein	Nein
Nährstoffgehalte Boden	Nein	C/N, P _{DL} , Mg _{CaCl2} , C _{org} , K _{DL}	C/N, P _{DL} , Mg _{CaCl2} , C _{org} , K _{DL} , pH-Wert

Zur Ernte der oberirdischen Biomasse wurden die Pflanzen ca. 1 cm oberhalb des Bodens abgeschnitten. Anschließend sind die Ähren bzw. Kolben vom Rest der Pflanze entfernt worden. Durch zeitnahes Wiegen sind für jede einzelne Pflanze die Frischmasse (FM) von Stroh und Kolben bzw. der Ähren bestimmt worden. Die durchschnittliche FM je Versuchsvariante wurde über die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes aller gewogenen Pflanzen ermittelt. Zur Bestimmung der Trockenmasse (TM) wurde das frische Pflanzenmaterial aller Pflanzen einer Versuchsvariante zunächst auf maximal 5 cm lange Stücke gehäckselt. Aus dieser Mischprobe wurden dann drei repräsentative Unterproben von ca. 50 g – 100 g entnommen und im Trockenschrank bei 105 °C mindestens 24 h getrocknet und anschließend erneut gewogen. Aus diesem Ergebnis konnte die durchschnittliche Gesamttrockenmasse sowie der Trockensubstanzgehalt berechnet werden. Ebenso wurde nach deren Entfernung vom Kolben die Frisch- und Trockenmasse sowie das Tausendkorngewicht der Körner bestimmt. Zur Bestimmung des Tausendkorngewichtes wurden je Versuchsvariante 1.000 Körner aus einer Mischprobe abgezählt und gewogen. Aufgrund des hohen Aufwandes und der geringen Anzahl an Körnern wurden die Ähren des Sommerweizens nicht gedroschen. In Vorbereitung der chemischen Analysen wurden Stroh und Korn bei maximal 60 °C getrocknet. Anschließend wurde das Material mit einer Hammermühle gemahlen und im Gemeinschaftslabor Analytik am Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften an der HU zu Berlin nach den im Anhang in Tab. A 4 genannten Vorschriften analysiert.

6.2.5 Statistische Auswertung mit R (3.2.2)

Korrelationsanalyse

Über die Funktion *corr.test* (...) lassen sich in der Statistiksoftware R paarweise Korrelationen von normalverteilten Elementen einer Matrix berechnen. Ermittelt wird der Korrelationskoeffizient *r* nach Pearson, der einen linearen Zusammenhang zweier Variablen beschreibt. Dieser kann Werte zwischen -1 (negativer Zusammenhang) und 1 (positiver Zusammenhang) annehmen. Liegt der Wert nahe Null, lässt sich kein Zusammenhang feststellen (DULLER, 2008). Korrelationsanalysen wurden in den Versuchsreihen 1 und 3 durchgeführt. Versuchsreihe 2 lieferte hierfür keine ausreichenden Datensätze.

Multiple lineare Regressionsanalyse (MLR)

Mit Hilfe der MLR wird geprüft, ob eine lineare Beziehung zwischen einer zu modellierenden Variable *y* zu einer oder mehreren Eingangsvariablen *x* besteht (FRIEDMAN et al., 2001). In diesem Fall sollte geprüft werden, in welcher Abhängigkeit der Turgor einer Pflanze von den Parametern Bodenfeuchte, Strahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte steht. Hierzu wurde in R die Funktion *lm*(...) genutzt.

ANOVA

Auf die Parameter Turgor und Bodenfeuchte wurde bei den Versuchsreihen 1 und 3 eine einfaktorielle ANOVA angewendet. Für eine ANOVA müssen die untersuchten Stichproben Normalverteilung und Varianzhomogenität aufweisen sowie unabhängig voneinander sein. Die zu prüfende Nullhypothese besagt, dass mit einer in diesem Fall festgelegten Wahrscheinlichkeit von 95 % keine Unterschiede in den Mittelwerten der Faktorstufe vorliegen. In R wird die Durchführung der Analyse mit der Funktion *aov*(...) realisiert. Um alle Gruppen miteinander vergleichen zu können, wurde die Tukey-Prozedur (*TukeyHSD*) angewendet. Im Ergebnis lässt sich ermitteln, welche der untersuchten Gruppen signifikante Unterschiede (mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %) aufweisen (HOFF et al., 2008; KABACOFF, 2015).

Diskriminanzanalyse

Ziel der Diskriminanzanalyse ist es, aufgrund der betrachteten Parameter/Variablen Gruppenzugehörigkeiten zu identifizieren. Dazu wurde mit Hilfe von R die Funktion *lda*(...) durchgeführt. Die hierfür zu erfüllenden Voraussetzungen der Datensätze entsprechen denen einer

ANOVA. Mit der *lda*-Funktion in R wird eine Diskriminanzanalyse nach Fisher berechnet, wobei die Variabilität innerhalb der identifizierten Klassen minimiert und zwischen den Klassen maximiert wird (DECKER et al., 2010).

6.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Darstellung der Ergebnisse und die Diskussion erfolgen, aufgrund der Komplexität und der zeitlichen Unterschiede sowie inhaltlichen Schwerpunkte (vgl. Kap.6.1), im Verlauf der nächsten Kapitel getrennt nach den einzelnen Versuchsreihen.

6.3.1 Versuchsreihe 1 (Mais 2014)

Zu Beginn der Versuche wurden alle Pflanzen automatisch über das Blumat-System mit Wasser versorgt. Dennoch zeigten sich nach etwa zweiwöchiger Wachstumsdauer zunehmend Unterschiede im Längenwachstum der Maispflanzen. Die Pflanzen der Versuchsvarianten, in denen Rohwolle, Schafwollpellets und Biertreber in das Substrat gemischt wurden, wuchsen ab diesem Zeitpunkt deutlich schneller als die der Kontrollgruppe (Substrat ohne weitere Beimengungen). Nach etwa einem Monat blieben auch die Pflanzen der Varianten der Rohwolle und des Biertrebers im Vergleich zu denen der Schafwollpellets im Längenwachstum zurück. Dennoch wiesen die Pflanzen dieser Varianten noch eine deutlich höhere Längenzunahme auf als die der Kontrollen (vgl. Anhang A 5). Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der Betrachtung der Entwicklungsstadien der Pflanzen nach BBCH-Codierung. Allerdings waren die Effekte hier erst nach fast zweimonatigem Wachstum zu beobachten. So entwickelten sich die Kontrollen im Vergleich zu den behandelten Varianten ab diesem Zeitpunkt deutlich langsamer. Weiterhin war der Unterschied in den Entwicklungsstadien zwischen den Varianten der Schafwollpellets, der Rohwolle und der Biertreber wesentlich weniger stark ausgeprägt als bei der Zunahme des Längenwachstums (vgl. Anhang A 6). Die Chlorophyllgehalte geben einen Hinweis auf die Vitalität der Pflanzen und u. a. auch auf die Versorgung mit Nährstoffen, wobei in diesem Zusammenhang Stickstoff eine bedeutende Rolle spielt (MENGEL, 2013). Hier zeigte sich, dass es im Verlauf des Wachstums bei allen Varianten vor Induzierung der Wassermangelbedingungen zu einem unterschiedlich stark ausgeprägten Rückgang der SPAD-Werte kam. Besonders stark war dieser bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Die Pflanzen der behandelten Varianten wiesen ähnlich wie bei den Entwicklungsstadien nach BBCH-Codierung nur geringe Unterschiede in den Werten auf. Sowohl das stärkere Längenwachstum, die schnellere Entwicklung nach BBCH-Codierung und die insgesamt höheren

Chlorophyllgehalte deuten bei ausreichender Wasserversorgung auf eine höhere Photosyntheseaktivität in Folge einer besseren Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen im Vergleich zur Kontrollgruppe hin. Demnach kann für Biertreber ergänzend zu den Untersuchungen von MBWAGU (1990) festgehalten werden, dass in sandigem Substrat nicht erst ab Zugaben von 2,5 M.-% Biertrebern wachstumsfördernde Effekte zu erwarten sind, sondern diese waren in dieser Studie anhand des Wachstums und der Vitalität für die Versuchspflanze Mais bereits bei 0,5 M.-% nachweisbar. Für Rohwolle lassen sich im genutzten Ausgangssubstrat bei bereits geringen Aufwandmengen von 0,1 M.-% in Gewächshausversuchen ähnliche wachstumsfördernde Effekte für Mais feststellen, wie in den von SURUCHI et. al (2014) an Bohnen oder von VONCINA (2013) an Tabak im Freiland durchgeführten Studien.

Ab dem 15.07.2014 wurden je Versuchsvariante jeweils sieben Mitscherlichgefäße Wassermangelbedingungen (WMB) ausgesetzt und die acht verbleibenden weiterhin ausreichend mit Wasser versorgt. In Abb. 20 ist zu erkennen, dass die Pflanzen der Kontrollgruppen aufgrund ihres verminderten Längenwachstums den geringsten Wasserbedarf aller Varianten aufwiesen. Die Varianten mit Rohwolle und Biertreber besaßen hingegen ähnliche Verbrauchsraten, welche etwas geringer waren als die der Variante mit Schafwollpellets. Letztere benötigte aufgrund ihres deutlich stärkeren Längenwachstums und der damit höheren Biomasse das meiste Wasser. Mit Ausnahme der Kontrolle bekamen die Gefäße unter Wassermangelbedingungen in der Summe im Mittel 6,3 l Wasser bis zum Erntetermin. Um eine Austrocknung erreichen zu können, wurde die unter Wassermangelbedingungen zu haltende Kontrollgruppe nur mit im Mittel insgesamt 2,1 l bewässert.

Eine Erfassung der Längenzunahme erfolgte ab Beginn der Wassermangelbedingungen nicht mehr, da die Pflanzen sich zu diesem Zeitpunkt bereits im BBCH-Stadium der Blüte befanden und ein Längenwachstum hier nicht mehr zu erwarten war. Auch das Risiko einer Beschädigung der Pflanzen war ab diesem Zeitpunkt zu hoch. Eine Erfassung des Entwicklungsstandes nach BBCH-Codierung war jedoch ohne Probleme möglich.

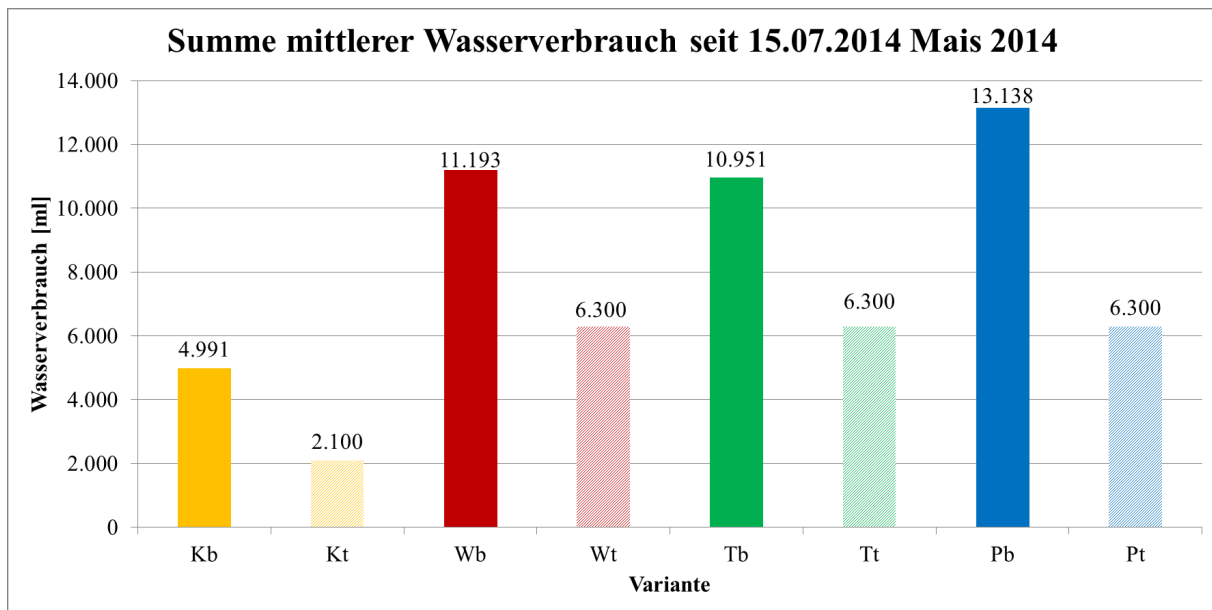


Abb. 20: VR 1 Summe des Wasserverbrauchs der einzelnen Versuchsvarianten mit Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen); n=6

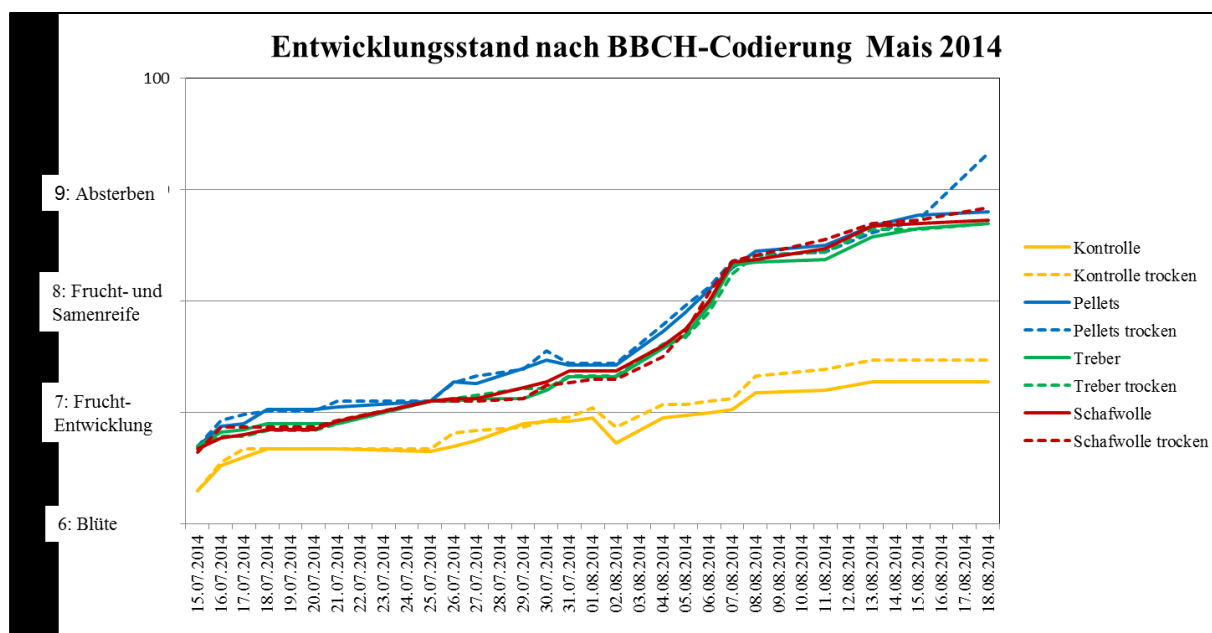


Abb. 21: VR 1 Mais Entwicklungsstand nach BBCH-Codierung nach Induzierung Wassermangelbedingungen (=trocken); n=6

Bei den behandelten Varianten lassen sich nur geringfügige Unterschiede in der Entwicklung untereinander aber auch im Vergleich zwischen den ausreichend bewässerten Pflanzen sowie den Pflanzen, die Wassermangelbedingungen ausgesetzt waren, feststellen. Im Gegensatz dazu waren die beiden Kontrollgruppen deutlich schlechter entwickelt. Zudem zeigten diese

beiden Gruppen ca. zwei Wochen nach Beginn der Wassermangelbedingungen deutliche Unterschiede untereinander. Hier entwickelte sich die Gruppe Kontrolle trocken (= Wassermangelbedingungen) im Bereich der Fruchtentwicklung schneller als die ausreichend bewässerte Kontrollgruppe. Durch den während des Blütestadiums induzierten Wasserstress kommt es zu einer Minderversorgung der jungen entstehenden Körner mit Assimilaten. Diese brechen dadurch ihre Entwicklung frühzeitig ab und reifen deutlich früher als die Körner der mit ausreichend Wasser versorgten Pflanzen (SCHREIBER, 1992). Verstärkt wird dieser Prozess bei den Kontrollen auch durch das vergleichsweise geringe Nährstoffangebot des Ausgangssubstrates. Einen entscheidenden Einfluss hat in diesem Zusammenhang vor allem Stickstoff (WOLFE et al., 1988). Bei den mit Schafwollpellets, Rohwolle und Biertrebern behandelten Varianten lassen sich im Vergleich dazu diese Unterschiede nicht feststellen. In Bezug auf die Ergebnisse der Nährstoffanalysen der einzelnen Rohstoffe (vgl. Kap. 5.3) lässt sich vermuten, dass durch Mineralisierungsprozesse Nährstoffe zur Verfügung gestellt werden. Bestätigt wird das durch vergangene Untersuchungen mit Rohwolle (SURUCHI, 2013 und ZHELJAZKOV et.al, 2009) oder Biertreber (MATHIAS DOS SANTOS et al., 2015). Durch die zugeführten Nährstoffe und die hohe WNE von Mais als C₄-Pflanze war eine vergleichbare Entwicklung in der Kornfüllungsphase zwischen den ausreichend bewässerten Pflanzen und den Pflanzen mit Wassermangelbedingungen möglich. Anhand der Bodenfeuchtedaten in Abb. 22 ist zu erkennen, dass sich unter Wassermangelbedingungen die behandelten Varianten in diesen Werten untereinander signifikant unterscheiden. Im Vergleich zur Kontrolle waren die Varianten der Biertreber und der Rohwolle trockener, was aber durch einen höheren Wasserbedarf aufgrund des höheren Längenwachstums und mit der daraus folgenden höheren Biomasse und dem besseren Entwicklungsstand der Pflanzen zu begründen ist. Unter diesem Aspekt scheinen vor allem die eingemischten Schafwollpellets zu einer nachweisbaren Erhöhung der Bodenfeuchte des Ausgangssubstrates beizutragen. Im Vergleich zu den Varianten der Biertreber und der Rohwolle konnte durch die Zugabe der Schafwollpellets trotz höherer Biomasse und ähnlichem Entwicklungsstand der Pflanzen (vgl. Anhang A 5; A 6; A 7 und Abb. 21) bei gleicher Bewässerungsmenge von in der Summe 6,3 l (vgl. Abb. 20) im Mittel eine signifikant höhere Bodenfeuchte erreicht werden. Weiterhin wurde bei der Variante mit eingebrachten Biertrebern eine signifikant höhere Bodenfeuchte realisiert als bei der Variante mit Rohwolle. Anhand der Boxplots der ausreichend bewässerten Varianten ist zudem zu erkennen, dass das Bewässerungssystem wahrscheinlich nicht durchgehend ausreichend Wasser für die Pflanzen zur Verfügung stellen konnte. Daher ist auch hier zu erkennen, dass die eingebrachten Biertreber trotz eines geringeren Wasserverbrauchs zu einer signifikant höheren Bodenfeuchte geführt haben

als es bei den Varianten mit Rohwolle der Fall war. Bei der Variante der Schafwollpellets wurde trotz des höchsten Gesamtverbrauches generell zu wenig Wasser über das Bewässerungssystem zur Verfügung gestellt, sodass es hier zu einer vergleichsweise geringen Bodenfeuchte kam. Ursache hierfür ist die im Vergleich zu den anderen Varianten sehr hohe Biomasse. Diese ist bedingt durch das starke Längenwachstum und die hohe Vitalität der Pflanzen in Folge einer vergleichsweise guten Nährstoffversorgung. Die Bodenfeuchten unterscheiden sich zwischen den Varianten der ausreichend bewässerten Kontrolle zu denen der unter Wassermangelbedingungen stehenden Kontrolle nur geringfügig. Dennoch kommt es zu dem weiter oben im Text beschriebenen Effekt der schnelleren Abreife der Pflanzen (AMLER, 2003) unter Wassermangelbedingungen. Allerdings waren die ausreichend bewässerten Varianten der Kontrolle kontinuierlich bewässert, wohingegen die Varianten unter Wassermangelbedingungen teilweise über kurze Zeiträume stark austrockneten und anschließend je nach Bedarf mit einer Wassermenge zwischen 50 ml bis 200 ml pro Gefäß versorgt wurden. Dieses führte zu der größeren Spannweite der gemessenen Bodenfeuchtwerte, die im Boxplot Kt erkennbar sind. So ist anzunehmen, dass einzelne starke Austrocknungsereignisse, bei denen teilweise nur Bodenfeuchten von unter 10 Vol.-% erreicht worden sind, zu dem geschilderten Effekt der früheren Reife geführt haben.

In den normalisierten Turgorwerten (vgl. Anhang Tab. A 5 und Abb. 23) spiegeln sich die Unterschiede der Bodenfeuchte kaum wider. Nur im Vergleich der Kontrollgruppen lässt sich ein signifikanter Unterschied der normalisierten Turgorwerte zwischen den bewässerten und den unter Wassermangelbedingungen stehenden Pflanzen erkennen. Das Signal ist invers zu interpretieren. D. h., ein geringer Wert in der Darstellung lässt auf hohe Turgorwerte der Pflanzen schließen. Demnach wiesen die Pflanzen der Kontrolle unter Wassermangelbedingungen, wie zu erwarten war, deutlich geringere normalisierte Turgorwerte (TN) auf als die bewässerten.

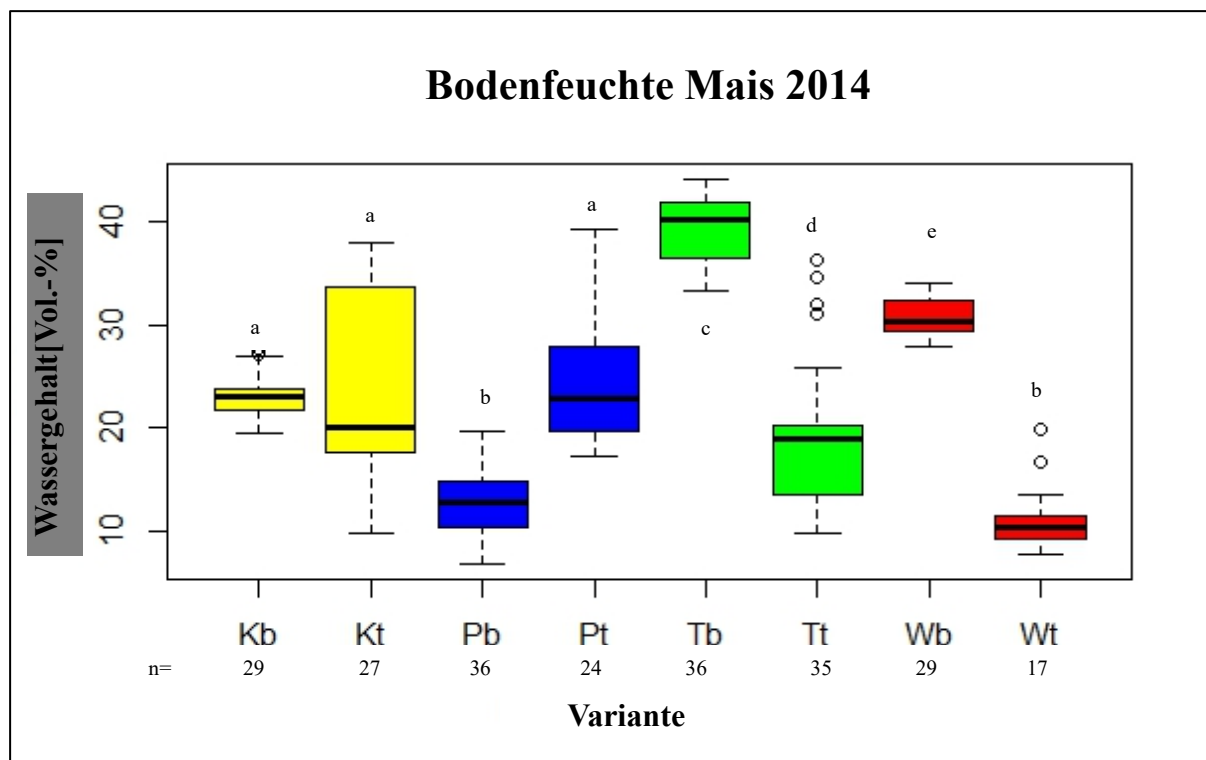


Abb. 22: VR 1 Boxplots der Bodenfeuchte [Vol.-%] der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,05$

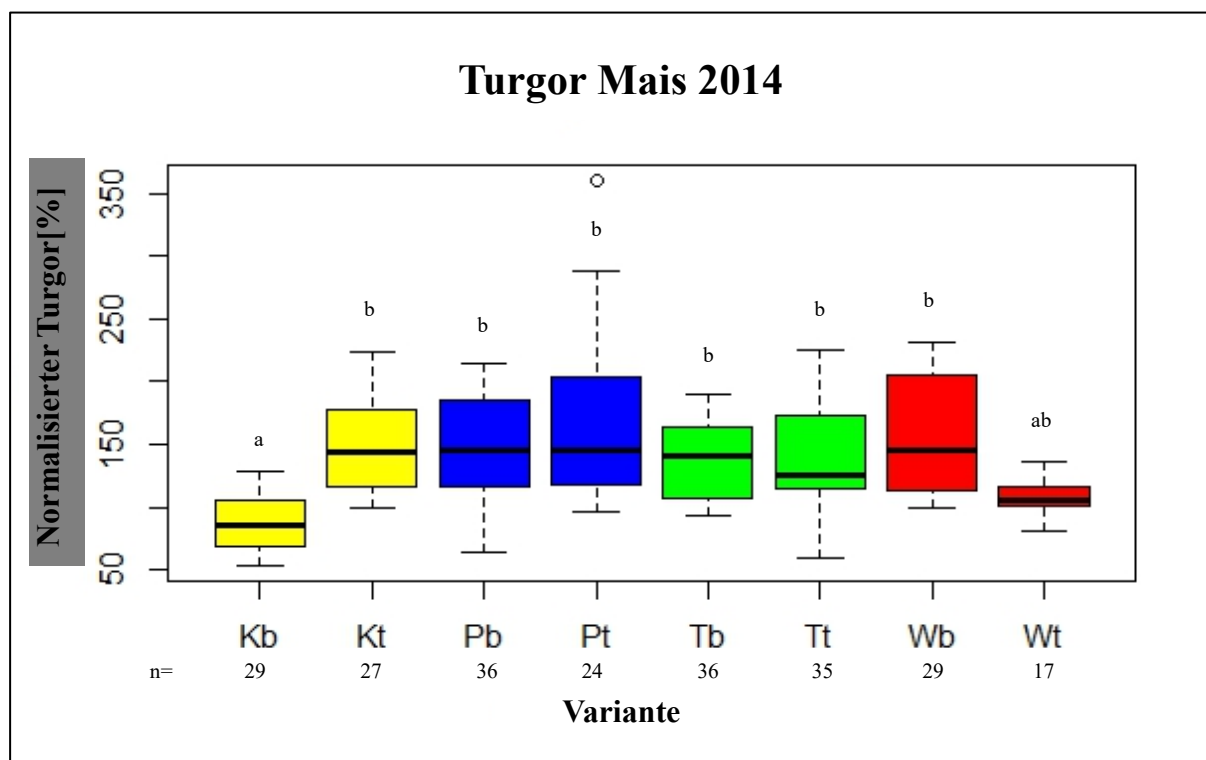


Abb. 23: VR 1 Boxplots der normalisierten Turgorwerte [%] (invers) der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,05$

Bestätigt wird dieser Zusammenhang durch die MLR mit den Eingangsparametern Bodenfeuchte (SM), Lufttemperatur (AT) und Luftfeuchte (AH). Über diese Eingangsparameter lässt sich das berechnete Modell mit dem normalisierten Turgor als Ausgabevariable bei der Kontrolle unter Wassermangelbedingungen zu 69% erklären, wobei der größte lineare Zusammenhang zwischen dem Turgor und der Bodenfeuchte besteht. Bei der ausreichend bewässerten Variante werden 68% des Modells erklärt und auch hier besteht der größte lineare Zusammenhang zwischen dem Turgor und der Bodenfeuchte (vgl. Abb. 24).

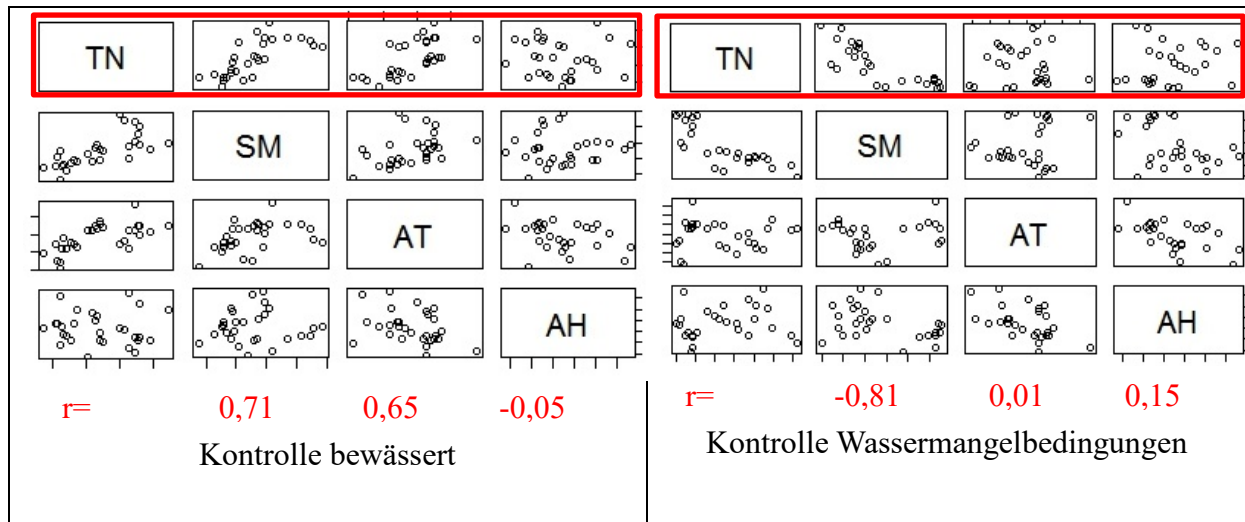


Abb. 24: VR 1 Scatterplots der Kontrollvarianten der MLR

Bei den behandelten Varianten zeigen sich in beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede der normalisierten Turgorwerte (vgl. Abb. 23). Dennoch weisen die einfachen Korrelationsanalysen sowohl bei den ausreichend bewässerten als auch bei den unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Pflanzen eine deutliche Beeinflussung durch die Bodenfeuchte auf. Weiterhin ist in der Gruppe der behandelten Varianten unter Wassermangelbedingungen mit Ausnahme der Schafwollpellets eine verstärkte Beeinflussung der normalisierten Turgorwerte auch durch die Lufttemperatur zu verzeichnen (vgl. Anhang Tab. A 6). Eine mögliche Interpretation dieser Werte bezieht sich auf die verfügbaren Nährstoffe (vgl. Tab. 1 und Tab. 4). So hängt der Turgor stark von den pflanzenverfügbaren Kaliumgehalten ab, da Kalium eine entscheidende Rolle bei der Öffnung und Schließung der Stomata zukommt (ASLAM et al., 2014). Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass bei ausreichender Kaliumversorgung Wasserstressbedingungen teilweise kompensiert werden können (PREMACHANDRA et al., 1993). Demnach kann sich schon ein vergleichsweise geringfügiger Wassermangel, wie bei der Kontrollgruppe aufgrund der fehlenden Nährstoffe, stark negativ auf den Turgor einer Pflanze auswirken. Die Pflanzen der behandelten Varianten haben hingegen durch die Zugabe

der Rohstoffe und deren Mineralisierung deutlich mehr Nährstoffe zur Verfügung gehabt, so dass Wassermangelbedingungen besser kompensiert werden konnten und keine signifikanten Unterschiede in den normalisierten Turgorwerten festgestellt wurden. Zudem kommt auch Überlagerungseffekten durch weitere Parameter wie der Biomasse, dem Entwicklungsstand, der Anordnung der Pflanzen im Raum (Beschattungseffekte, starke Sonneneinstrahlung) sowie einem Schädlingsbefall eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung des Turgors zu. Daher war es von Interesse, ob trotz der genannten Überlagerungsfaktoren aufgrund der Eingangsparameter normalisierter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur⁸, eine eindeutige Zuordnung von Einzelpflanzen zu ihrer entsprechenden Behandlungsvariante und den entsprechenden Wasserbedingungen möglich war. Durch die durchgeführte Diskriminanzanalyse zeigt sich, dass insbesondere die ausreichend bewässerten Pflanzen fast immer anhand der Eingangsparameter eindeutig zugeordnet werden können (vgl. Tab. 14).

Tab. 14: VR 1 Ergebnis der Diskriminanzanalyse mit den Eingangsparametern normalisierter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen)

Variante	Kb	Kt	Pb	Pt	Tb	Tt	Wb	Wt
Kb	24	2	0	2	0	2	1	0
Kt	1	5	0	4	0	5	3	0
Pb	1	1	35	0	0	3	0	1
Pt	0	1	0	12	0	3	1	0
Tb	0	4	0	3	35	3	0	0
Tt	3	11	1	3	0	14	0	1
Wb	0	3	0	0	1	0	24	0
Wt	0	0	0	0	0	5	0	15

Zusätzlich zu den im Verlauf des Pflanzenwachstums erhobenen Parametern wurden auch Ernteparameter ermittelt. Bestimmt wurden je Versuchsvariante und Bewässerungsbedingung die Frischmasse und die Trockenmasse vom Stroh, die Anzahl der gesamten Körner, das Tausendkorngewicht und der Rohproteingehalt in Stroh und Korn. Die höchsten Trockenmasseerträge werden hierbei durch die Pflanzen der bewässerten Variante der Schafwollpellets erzielt und die geringsten durch die unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Pflanzen der Kontrollgruppe. Den höchsten Trockensubstanzgehalt weisen die Pflanzen der bewässerten Vari-

⁸ Die Daten zu diesem Parameter wurden von der Yara ZIM plant Technology zur Verfügung gestellt. Eine Erläuterung zur Erhebungsmethodik kann an dieser Stelle nicht gegeben werden, da sich dieses System noch in der Entwicklung befindet und der Schweigepflicht unterliegt. Es sei anzumerken, dass die Blattoberflächentemperatur stark von der Lufttemperatur sowie dem Wasser- und Nährstoffhaushalt einer Pflanze abhängt.

anten der Kontrolle und der Schafwollpellets auf, die auch beide deutlich über denen der Pflanzen der Varianten unter Wassermangelbedingungen liegen. Bei den Pflanzen der Varianten Rohwolle und Biertreber zeigt sich ein anderes Bild. Hier weisen zwar die bewässerten Varianten ebenfalls die höchsten Trockenmasseerträge auf, allerdings sind die Trockensubstanzgehalte der Pflanzen im Vergleich zu denen der Varianten der Wassermangelbedingungen deutlich geringer. Da die Trockensubstanzgehalte ein Merkmal für das Stadium der Abreife sind (EDER und KRÜTZFELDT, 2000), lässt das den Schluss zu, dass sich die Pflanzen zum Erntezeitpunkt der unterschiedlichen Varianten nicht im gleichen Reifestadium befanden. Außerdem waren die Pflanzen der bewässerten Variante der Kontrolle und der Schafwollpellets weiter in ihrem Reifeprozess vorangeschritten als die der bewässerten Variante der Rohwolle und der Biertreber. Da, wie zuvor über die Bodenfeuchte festgestellt wurde, die bewässerte Variante der Schafwollpellets für die vergleichsweise hohe Biomasse nicht ausreichend Wasser zur Verfügung hatte, kam es auch in diesen Fällen zu einer verfrühten Abreife. Ebenfalls früher reiften die Pflanzen der unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Varianten der Rohwolle und der Biertreber im Vergleich zu den ausreichend bewässerten Pflanzen ab (vgl. Abb. 25).

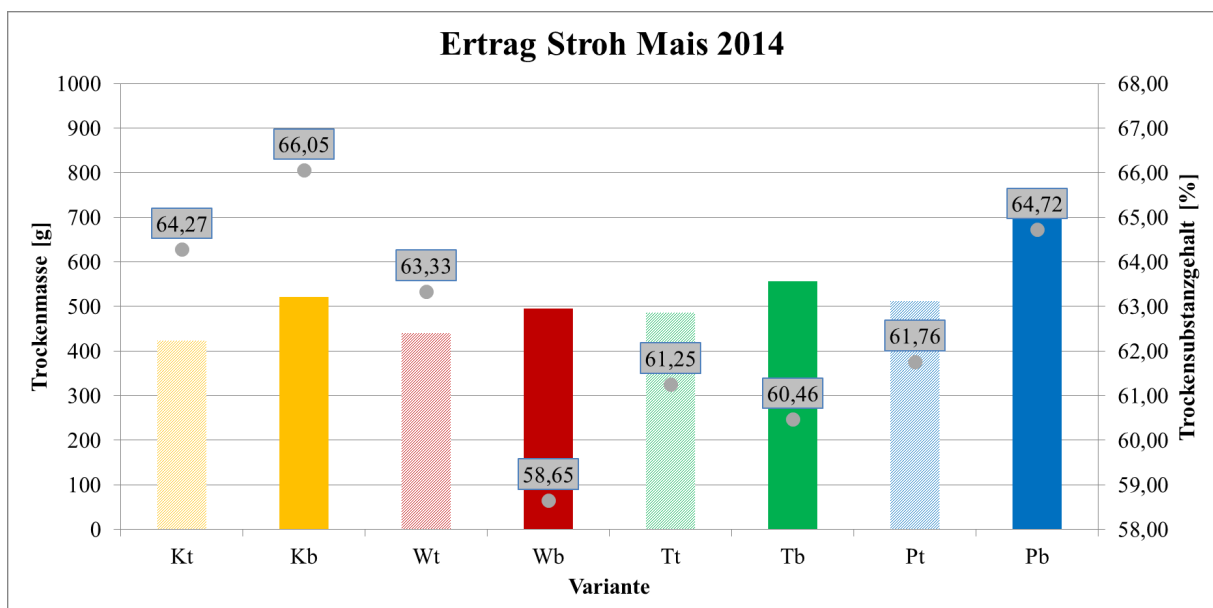


Abb. 25: VR 1 Mittlere Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte Stroh (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)

Diese Theorie wird bei Betrachtung der Tausendkorngewichte der einzelnen Varianten und der Bewässerungsbedingungen bestätigt. Durch die frühere Abreife der Pflanzen unter Wassermangelbedingungen wurden hier höhere Tausendkorngewichte erreicht als bei den ausrei-

chend bewässerten. Die ausreichend bewässerten Pflanzen haben allerdings durch die gute Wasserversorgung eine größere Anzahl an Körnern ausgebildet (vgl. Abb. 26). Ursächlich für die geringere Anzahl an Körnern bei den Pflanzen mit Wassermangelbedingungen ist insbesondere die Phase des Wassermangels zwischen dem Kolbenansatz und der Milchreife. So führt ein Mangel an Wasser im Bereich dieser Entwicklungsschritte bei Mais fast immer zu einem signifikanten Rückgang der Erträge (ROTH, 2014).

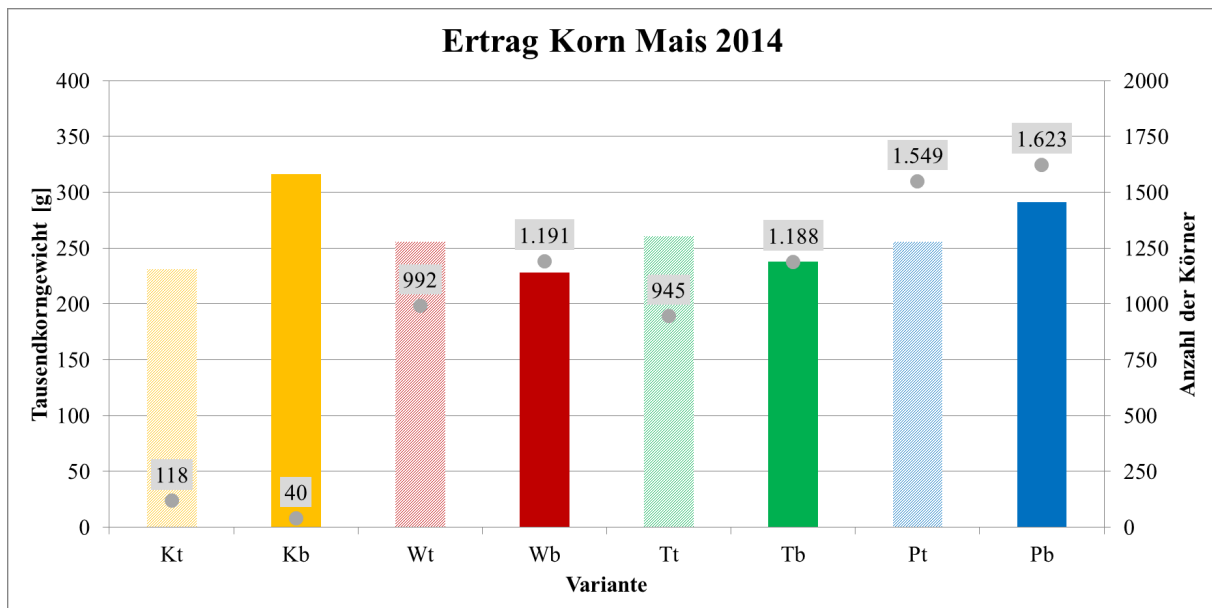


Abb. 26: VR 1 Mittlere Tausendkorngewichte (TKG) und mittlere Anzahl der Körner (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6)

Die Rohproteingehalte weisen wie auch die SPAD-Werte auf eine gute Nährstoffzufuhr für die Pflanzen durch Schafwollpellets hin. Bei den Varianten der Biertreber und der Rohwolle scheinen jeweils vergleichbare Gehalte an Nährstoffen zur Verfügung gestellt worden zu sein, die aber unter denen der Schafwollpellets lagen. Aufgrund der geringen Anzahl an Körnern bei den Kontrollgruppen war eine vergleichende Analyse mit diesen nicht möglich.

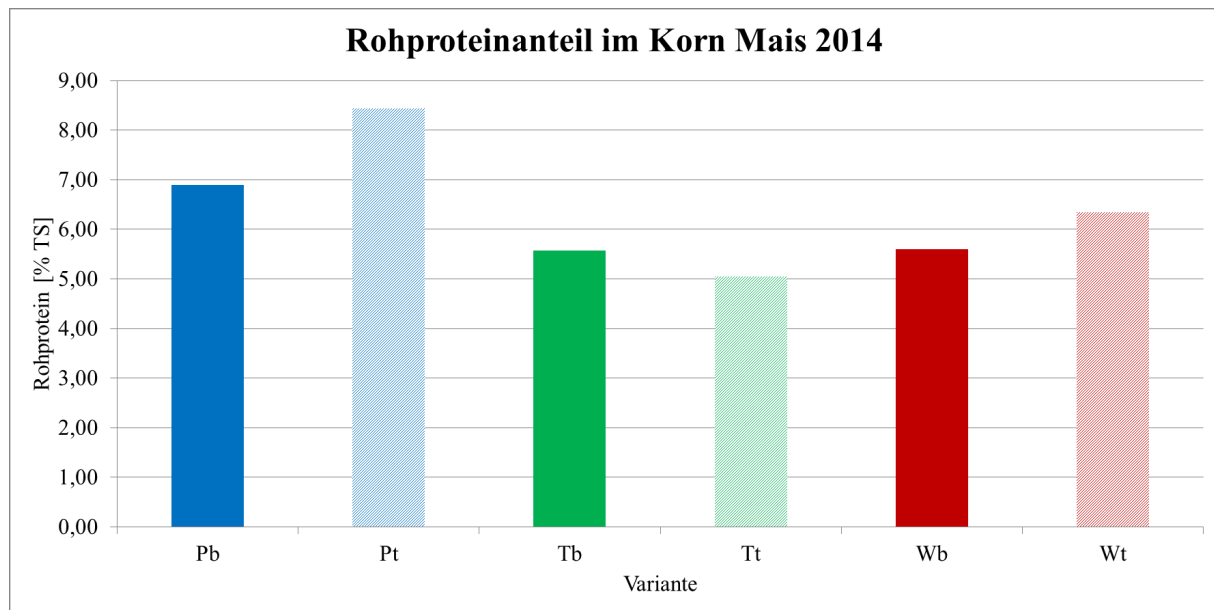


Abb. 27: VR 1 Rohproteinanteil (% TS) der behandelten Varianten (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=2)

Aus den Ergebnissen der Ernteparameter lässt sich ableiten, dass insbesondere die ausreichend bewässerten Varianten mit eingemischten Rohstoffen noch einige Tage der Reifezeit benötigt hätten. Demnach führen die verbesserten Bedingungen der Nährstoffverfügbarkeit und der Wasserversorgung bei den mit Rohstoffen behandelten Varianten zu einer vergleichsweise längeren Reifezeit aber auch zu einer deutlich besseren Qualität und zu größeren Mengen des entsprechenden Ernteguts.

6.3.2 Versuchsreihe 2 (Sommerweizen 2014)

Ebenso wie in VR 1 (vgl. Kap. 6.3.1) wurden für ca. zwei Monate vom 01.09.2014 bis zum 06.11.2014 bis zur Blüte des Weizens alle Gefäße bedarfsgerecht und demnach ausreichend mit Wasser versorgt. Bei der Längenentwicklung und der Codierung nach BBCH-Skala zeigten sich in diesem Zeitraum keine relevanten Unterschiede bei den Pflanzen der einzelnen behandelten Varianten aber auch zur Kontrolle (vgl. Anhang A 8 und Anhang A 9). Ab dem 06.11.2014 bis zum Zeitpunkt der Ernte am 15.12.2014 wurden nur noch die mit b gekennzeichneten Pflanzen automatisch mit einer ausreichenden Menge an Wasser versorgt. Die mit t gekennzeichneten Pflanzen wurden ab dem 06.11.2014 Wassermangelbedingungen ausgesetzt und bekamen im Mittel in der Summe bis zur Ernte 1,0 l Wasser. Bei den automatisch bewässerten Pflanzen erreichten die Varianten der Schafwollpellets mit im Mittel 2,27 l den höchsten und die Kontrollen mit im Mittel 1,94 l den geringsten Wert (vgl. Abb. 28).

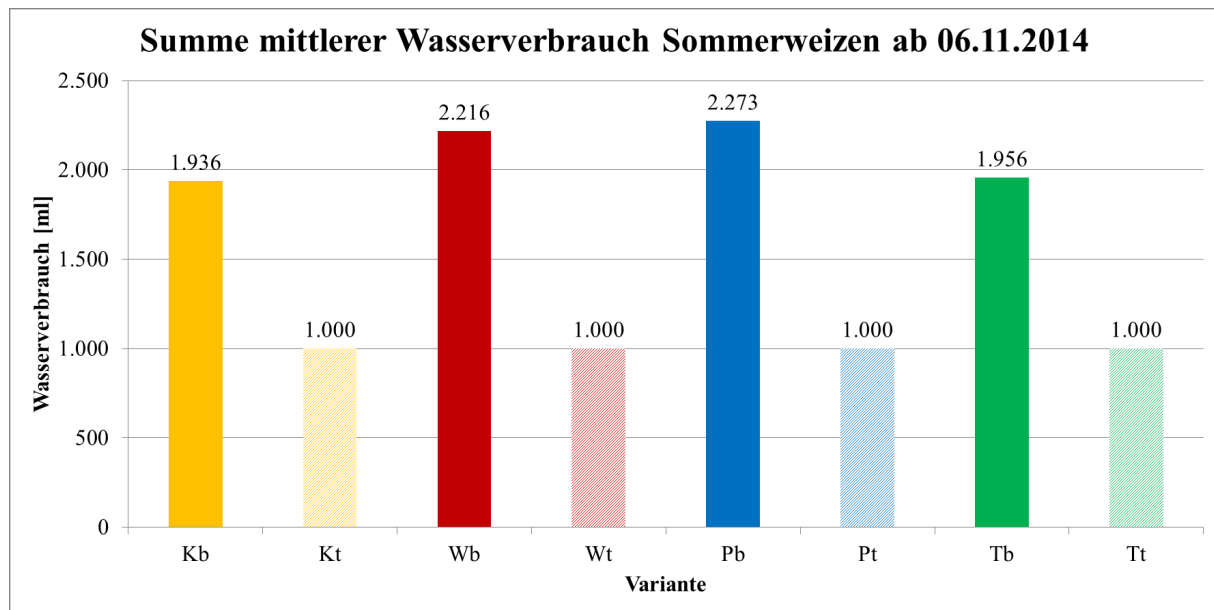


Abb. 28: VR 2 Summe des Wasserverbrauchs der einzelnen Versuchsvarianten vom Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)

Für beide Versuchsreihen ist etwa ein Monat des Wasserverbrauchs für die bewässerten und die unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Varianten in Diagrammen dargestellt worden (vgl. Abb. 20 und Abb. 28). Es fällt auf, dass der Bedarf beim Mais bei ca. 5,0 l bis ca. 13,0 l und der Bedarf beim Sommerweizen im Vergleich bei ca. 1,9 l bis 2,8 l gelegen hat. Die unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Pflanzen benötigten beim Mais 2,1 l bzw. 6,3 l und beim Sommerweizen 1,0 l. Ursächlich sind die differenzierten Strahlungsintensitäten und Durchschnittstemperaturen in Folge der unterschiedlichen Jahreszeiten während des Versuchsansatzes. Weiterhin benötigt Weizen trotz einer schlechteren WNE weniger Wasser als Mais (EHLERS, 2013 und DIEPENBROCK et. al, 2005). Nach Induzierung der Wassermangelbedingungen verlief die Entwicklung nach BBCH-Codierung aller Varianten immer noch nahezu parallel, sodass über diesen Parameter keine signifikanten Unterschiede zwischen den Pflanzen der einzelnen Versuchsvarianten identifiziert werden konnten (vgl. Tab. 15)

Tab. 15: VR 2 Entwicklungsstadien (Median) Sommerweizen nach Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6)

Variante	06.11.2014	10.11.2014	13.11.2014	17.11.2014	24.11.2014	01.12.2014	08.12.2014	15.12.2014
Kontrolle b	69	69	73	73	75	87	92	97
Kontrolle t	69	69	71	73	75	87	92	97
Rohwolle b	69	69	73	73	75	87	92	97
Rohwolle t	69	69	72	73	75	87	92	97
Pellets b	69	69	73	73	77	87	92	97
Pellets t	69	69	73	73	77	87	92	97
Biertreber b	69	69	73	73	77	87	92	97
Biertreber t	69	69	73	73	76	87	92	97

Etwa eine Woche vor Beginn der Wassermangelbedingungen kam es bei den Pflanzen der einzelnen Varianten zu einer Differenzierung im Längenwachstum. Dies hängt mit dem Stadium des Ährenschiebens zusammen. Demnach hatten die ausreichend bewässerten Pflanzen der Variante Schafwollpellets die am höchsten hervorstehenden Ähren und die Variante der bewässerten Rohwolle die niedrigsten. Alle Varianten unterschieden sich dennoch nur geringfügig durch wenige Zentimeter. Im Gegensatz zur VR 1 konnte auch keine deutliche Differenzierung zwischen den Pflanzen der ausreichend bewässerten Varianten und denen mit Wassermangelbedingungen festgestellt werden (vgl. Abb. 29).

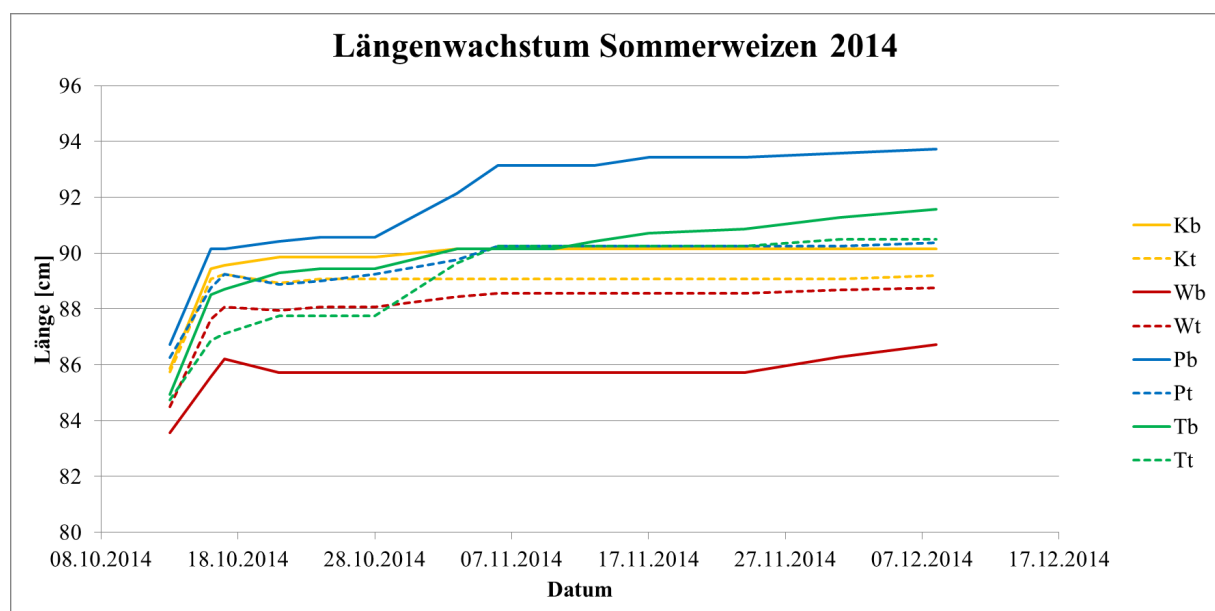


Abb. 29: VR 2 Mittleres Längenwachstum der einzelnen Versuchsvarianten mit Beginn der Wassermangelbedingungen bis zur Ernte der Pflanzen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=6)

Deutliche Unterschiede ließen sich hingegen bei den Chlorophyllgehalten der einzelnen Varianten und Bewässerungsbedingungen feststellen. Zu den drei nach der Induzierung der Wassermangelbedingungen durchgeführten Messterminen zeigten die Pflanzen der Kontrollen die geringsten SPAD-Werte. Auch war hier der Rückgang der Werte bis kurz vor dem Erntetermin im Vergleich am größten. Die Pflanzen der Kontrolle, welche unter Wassermangelbedingungen standen, wiesen zudem einen höheren Rückgang der Werte auf als die der ausreichend bewässerten Kontrolle. Bei den Varianten mit eingemischten Rohstoffen lassen sich kaum Unterschiede zwischen den ausreichend bewässerten Pflanzen und denen mit Wassermangelbedingungen identifizieren. Mit zunehmender Abreife der Pflanzen kam es bei allen Varianten mit im Substrat eingemischten Rohstoffen zu einem vergleichbaren Rückgang der SPAD-Werte. Dieser war bei der ausreichend bewässerten Variante der Biertreber dennoch am stärksten ausgeprägt. Ähnlich wie in VR 1 beim Mais weisen die über einen längeren Zeitraum im Vergleich zur Kontrolle höheren SPAD-Werte auf eine Versorgung mit Nährstoffen durch die in das Substrat eingemischten Rohstoffe hin. Der vergleichsweise starke Rückgang der Werte bei der bewässerten Variante des Biertreibers deutet, wie in Kap. 5.4.1 bereits vermutet, auf eine schnelle Mineralisierung der Treber unter feucht-warmen Bedingungen (SCHEFFER et al., 2013) hin, sodass die Nährstoffe in vergleichsweise kurzer Zeit freigesetzt wurden und insbesondere zu Beginn des Pflanzenwachstums zur Verfügung standen. Zudem wird die Photosyntheseaktivität unter Wassermangelbedingungen herabgesetzt, wobei C_4 -Pflanzen wie Mais hier gegenüber C_3 -Pflanzen wie Weizen einen Vorteil besitzen. C_4 -Pflanzen setzen ihre CO_2 Assimilation nicht nur über den Calvin-Benson-Zyklus um, sondern sie fixieren CO_2 über einen Zweistufenprozess. Hierbei findet die primäre Fixierung räumlich getrennt vom Calvin-Benson-Zyklus statt, sodass eine vergleichsweise bessere Adaption an höhere Temperaturen und periodische Trockenheiten gegeben ist (WILD und SCHMITT, 2012). Somit fällt eine Reduzierung der Chlorophyllgehalte in Folge verminderter Photosyntheseaktivitäten durch Trockenheit bei C_3 -Pflanzen im Vergleich zu C_4 -Pflanzen wesentlich stärker aus (vgl. auch die Kontrollgruppen des Weizens in Abb. 30 mit den Kontrollgruppen des Mais in Anhang A 14).

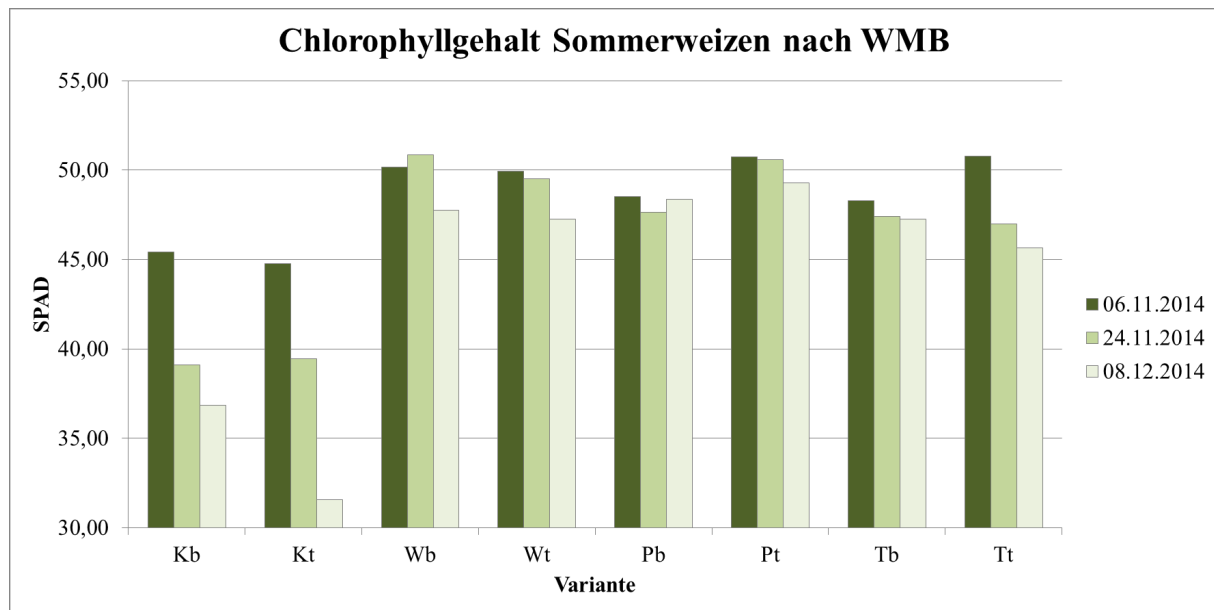


Abb. 30: VR 2 Mittlerer Chlorophyllgehalt Sommerweizen nach Beginn der Wassermangelbedingungen (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n=150)

Die nach der Ernte der Pflanzen ermittelten Frischmasseerträge für das Stroh zeigen, dass die Pflanzen, die auf Substrat mit eingemischten Rohstoffen gewachsen sind, eine höhere Biomasse ausgebildet haben als die Kontrollen. Ähnlich wie beim Mais in VR 1 scheinen die Pflanzen der Kontrollen mit Wassermangelbedingungen, diese aufgrund fehlender Nährstoffe nicht kompensieren zu können. Ebenfalls eine geringere Biomasse wiesen die Pflanzen der Variante der Schafwollpellets auf. Da die Pflanzen dieser Variante unter Wassermangelbedingungen hier ähnliche Frischmasseerträge wie die der Rohwolle und der Biertreber realisieren konnten, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hier unter der gegebenen Sortenwahl, den Bewässerungsbedingungen und den Umgebungsparametern (LF, AH, PL und weiteren) um die maximal mögliche Menge an Frischmasse handelte. Zu Vegetationsbeginn wird bei Getreide in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung zunächst die Triebzahl pro Pflanze festgelegt, was bei hohen Triebzahlen letztendlich zu einer hohen realisierten Biomasse führt (KNITTEL et al., 2003). Durch den Hersteller der Schafwollpellets wird beworben, dass nach Einarbeitung in den Boden eine sofortige Bereitstellung an Nährstoffen erfolgt (FLORAPELL, 2016), wohingegen diese bei der Rohwolle und dem Treber erst durch Mineralisierungsprozesse zur Verfügung gestellt werden müssen. Aufgrund einer vermutlich geringeren Nährstoffmenge zu Vegetationsbeginn lagen die Frischmasseerträge der Pflanzen der ausreichend bewässerten Varianten mit Rohwolle und Biertreber unter denen der Schafwollpellets (vgl. Abb. 31).

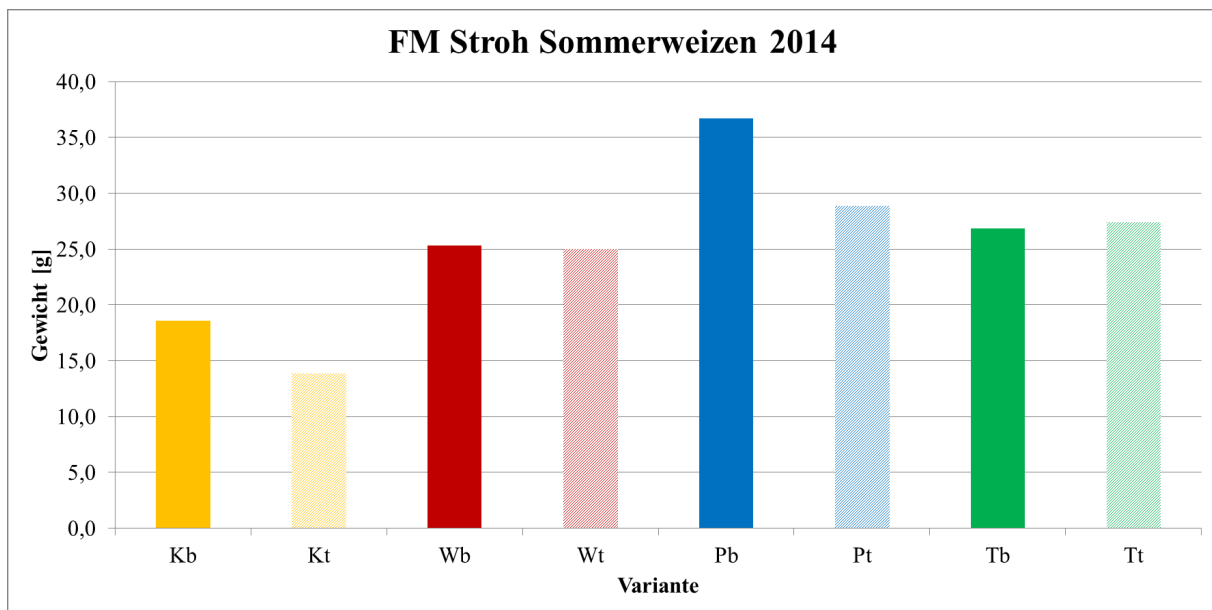


Abb. 31: VR 2 Mittlere Frischmasse (FM) Stroh Sommerweizen 2014 (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6)

Nach KNITTEL (2003) wird die Anzahl der Körner pro Ähre ab dem Schossbeginn und das Korngewicht zum Zeitpunkt des Ährenschiebens in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung festgelegt. Das Gewicht der Ähren setzt sich hauptsächlich aus dem Korngewicht und der Anzahl der Körner zusammen. Demnach ist davon auszugehen, dass durch Mineralisierungsprozesse bei den bewässerten Varianten der Biertreber und der Rohwolle zu diesen Entwicklungsstadien der Pflanzen ähnliche Nährstoffmengen pflanzenverfügbar waren wie bei den Schafwollpellets. Die Kontrollen wiesen erwartungsgemäß aufgrund fehlender Nährstoffe die geringsten Ährengewichte auf. Interessant ist zudem, dass zwischen den Varianten der Kontrolle mit Wassermangelbedingungen und denen mit ausreichender Bewässerung kaum Unterschiede bei diesem Parameter festzustellen sind. Im Gegensatz dazu wiesen die auf den Substrat-Rohstoffgemischen gewachsenen Pflanzen unter Wassermangelbedingungen deutlich geringere Ährengewichte auf als die ausreichend bewässerten. Da die Pflanzen der mit Biertreber vermischten Substrate die höchsten Ährengewichte hatten (vgl. Abb. 32), ist davon auszugehen, dass bereits vor Induzierung der Wassermangelbedingungen ein Großteil der Treber mineralisiert wurden und somit pflanzenverfügbare Nährstoffe in den durch KNITTEL (2003) beschriebenen Entwicklungsstadien zur Verfügung standen. Diese Mineralisierungsprozesse laufen bei Rohwolle und Schafwollpellets nachweislich deutlich langsamer ab (vgl. Kap.5.4.1 und 5.4.2). Bestätigt wird diese Vermutung durch die Nährstoffanalysen des Pflanzenmaterials und der Substrat-Rohstoffgemische nach Ernte des Pflanzenmaterials (vgl. An-

hang Tab. A 7 und Anhang Tab. A 8). Hier liegen beispielsweise die Kaliumgehalte des Bodens mit eingemengten Biertrebern trotz geringerer Gesamtgehalte (vgl. Tab. 4) auf ähnlichem Niveau wie es bei Zugabe von Rohwolle der Fall ist. Daher ist davon auszugehen, dass vor allem durch die Schafwollpellets zwar zu Beginn der Wachstumsperiode eine Initialdüngung gegeben wird, weitere Nährstoffe aber erst durch Mineralisierungsprozesse freigesetzt werden müssen, was wie bereits erwähnt unter feuchten Bedingungen deutlich schneller realisiert wird als unter trockenen.

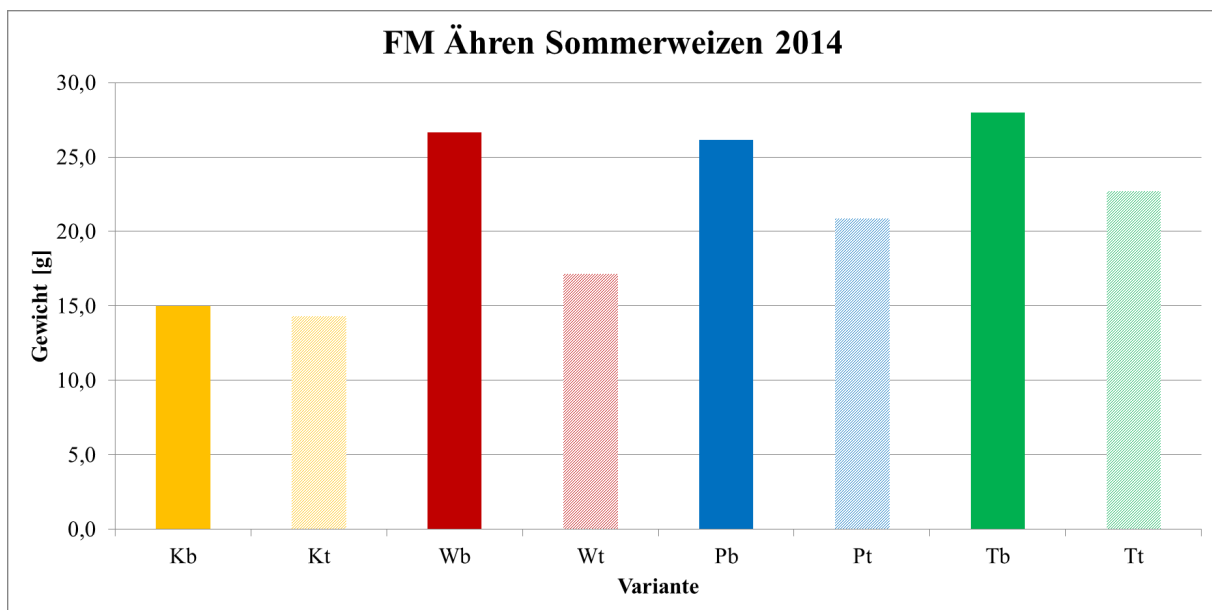


Abb. 32: VR 2 Mittlere Frischmasse (FM) Ähren Sommerweizen 2014 (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=6)

6.3.3 Versuchsreihe 3 (Mais 2015)

Zu Beginn des Versuches wurden auch hier alle Pflanzen über das Blumatsystem ausreichend mit Wasser versorgt. Nach etwa drei Wochen Wachstumsdauer wurden bei fünf der zehn je Variante aufgestellten Gefäße Wassermangelbedingungen induziert. Vor Beginn der Wassermangelbedingungen zeigten sich bei den Pflanzen keine signifikanten Unterschiede im Längenwachstum und in den Entwicklungsständen nach BBCH-Codierung (vgl. Anhang A 11 und Anhang A 12) zwischen den einzelnen Versuchsvarianten. Nachdem am 16.06.2015 die Wassermangelbedingungen einsetzten, ist in Abb. 33 zu erkennen, dass etwa nach einer Woche die Längenzunahme der unter Wassermangelbedingungen stehenden Pflanzen in allen Varianten im Vergleich zu denen der ausreichend bewässerten Pflanzen stark abnimmt. Die Entwicklung der Pflanzen nach BBCH-Codierung weist hingegen kaum Unterschiede zwischen den Varianten auf (vgl. Abb. 33 und Tab. 16).

Tab. 16: VR 3 Mittlere BBCH-Stadien der einzelnen Versuchsvarianten nach Induzierung der Wassermangelbedingungen (b=bewässert, t=trocken=Wassermangelbedingungen; n=5)

Variante	18.06.2015	22.06.2015	25.06.2015	30.06.2015	02.07.2015
Kontrolle b	32	33	34	34	34
Kontrolle t	32	33	34	34	34
Dünger b	33	33	34	34	34
Dünger t	33	33	33	34	34
Wolle b	32	33	34	34	34
Wolle t	32	33	34	34	34
Treber b	32	33	34	35	35
Treber t	32	33	34	34	34

Ähnliches lässt sich auch für die Chlorophyllgehalte feststellen. Einzig die Kontrollen wiesen aufgrund der fehlenden Nährstoffzufuhr nach ca. zweiwöchiger Wachstumsdauer einen vergleichsweise starken Rückgang der SPAD-Werte auf (vgl. Anhang A 14).

Beim Längenwachstum sind bei den Pflanzen zudem starke Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungsvarianten zu erkennen. So hatten die Kontrollen (bewässert und Wassermangelbedingungen) im Vergleich zu den Varianten (Wolle, Treber und NPK-Dünger) mit der jeweils entsprechenden Wasserversorgung die schlechtesten Zuwachsraten. Unter Wassermangelbedingungen (1,6 l Wasser bis zur Ernte, vgl. Anhang A 13) wiesen die Pflanzen der Variante des NPK-Düngers den höchsten Längenzuwachs auf. Demnach waren die gedüngten Pflanzen durch eine hohe Zufuhr an Nährstoffen, ähnlich denen der Schafwollpellets aus VR 1, in der Lage, Wassermangelbedingungen im Vergleich zu den anderen Varianten am besten zu kompensieren. Treber weisen, wie in VR 2 nachgewiesen, unter feuchten Bedingungen eine hohe Mineralisierungsrate auf. Dennoch fehlen wichtige Nährstoffe wie Kalium, um ein effektives Längenwachstum und damit eine Zunahme an Biomasse auch unter Wassermangelbedingungen zu erreichen, die mit denen der mit Mineraldünger behandelten Varianten vergleichbar wären. Im Vergleich zu VR 1 und 2 wurden die Wassermangelbedingungen bereits nach kurzen Zeiträumen eingeleitet, sodass die Mineralisierungsprozesse der Treber aufgrund der Trockenheit vermutlich langsamer abgelaufen sind. Ähnliches gilt für die Varianten mit Rohwolle, nur dass hier aufgrund der bereits erläuterten langsamen Mineralisierungsprozesse insbesondere unter trockenen Bedingungen keine ausreichenden Mengen an Nährstoffen zur Verfügung gestellt werden konnten, die einen Vergleich mit herkömmlichen Mineraldüngern erlauben. Unter ausreichender Wasserversorgung und ähnlichem Bedarf scheinen fehlende Nährstoffe wie Kalium eine weniger relevante Rolle zu spielen, sodass hier

durch die Varianten der Rohwolle und Treber höhere Längenzunahmen als bei den gedüngten Varianten erreicht wurden (vgl. Abb. 33).

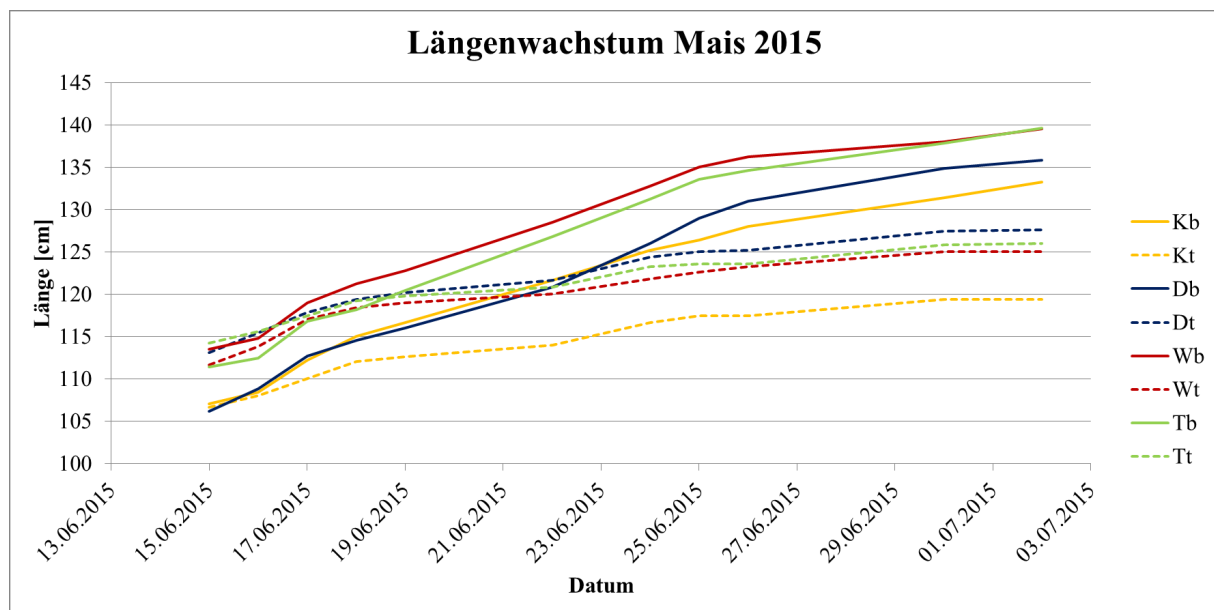


Abb. 33: VR 3 Längenwachstum Mais 2015 ab 15.06.2015 (b=bewässert, t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)

Bei der Interpretation der Bodenfeuchtwerte [Vol.-%] fällt auf, dass für ein sandiges Substrat teilweise nur Werte im Bereich des PWP oder darunter gemessen wurden. Ursache hierfür ist der Versuchsaufbau im Zusammenhang mit hohen Temperaturen während der Versuchsdurchführung. Bei den bewässerten Varianten war zwischen dem Bewässerungskegel und dem Bodenfeuchtesensor die Pflanze, sodass diese aufgrund der Umgebungsbedingungen und des daraus resultierenden hohen Wasserbedarfs eine gleichmäßige Durchfeuchtung des Substrates im Gefäß verhindert hat. Für die Gefäße mit Wassermangelbedingungen kann festgestellt werden, dass diese durch händische Bewässerung zeitweise eine größere Menge Wasser erhalten haben. Anschließend fielen die Bodenfeuchtigkeiten aber schnell teilweise unterhalb des PWP. Demnach hatten die Pflanzen in beiden Gruppen zumindest periodisch ausreichend Wasser zur Verfügung. Dennoch ergeben sich aufgrund der genannten Tatsachen in den Mittelwerten Bodenfeuchtigkeiten unterhalb des PWP (vgl. Abb. 34). Eine Interpretation der Werte zwischen den Varianten ist dennoch möglich, da der Versuchsaufbau aller Gefäße gleich war. Es kann demnach verglichen werden, ob die Bodenfeuchtigkeiten der Varianten höhere oder geringere Messwerte zueinander haben. Aussagen zu den absoluten Messwerten der Bodenfeuchtigkeiten sind hingegen nicht möglich, da diese nicht den realen Wassergehalt im gesamten Gefäß widerspiegeln.

Bei Betrachtung der Werte im Detail fällt auf, dass trotz des größten Längenwachstums der Pflanzen der bewässerten Varianten Biertreber und Rohwolle der Wasserverbrauch bei der ausreichend bewässerten Variante mit NPK-Dünger in der gemittelten Summe am größten war. Allerdings wurden trotz des Mehrverbrauchs von Wasser im Mittel nur geringfügig höhere Bodenfeuchten erzielt. Auffällig ist allerdings die Spannweite der Messwerte der Variante Db, wodurch auch der signifikante Unterschied zu den anderen bewässerten Varianten zu erklären ist. Der Mittelwert liegt in etwa auf dem Niveau von Tb und Kb. Durch die ermittelten Messwerte bei der Zugabe von Trebern ist indirekt eine Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des Substrates anzunehmen. So lagen die Bodenfeuchten der bewässerten Varianten der Kontrolle und die der Biertreber trotz der höheren Biomasse der Biertreber auf etwa einem Niveau. Weiterhin wies die Variante der bewässerten Rohwolle trotz des ähnlichen Längenzuwachses der Pflanzen eine geringere Bodenfeuchte auf. Demnach sind die Treber im Gegensatz zu Rohwolle nach den betrachteten Messzeiträumen in der Lage, zu einer messbaren Erhöhung der Bodenfeuchte beizutragen (vgl. Abb. 34).

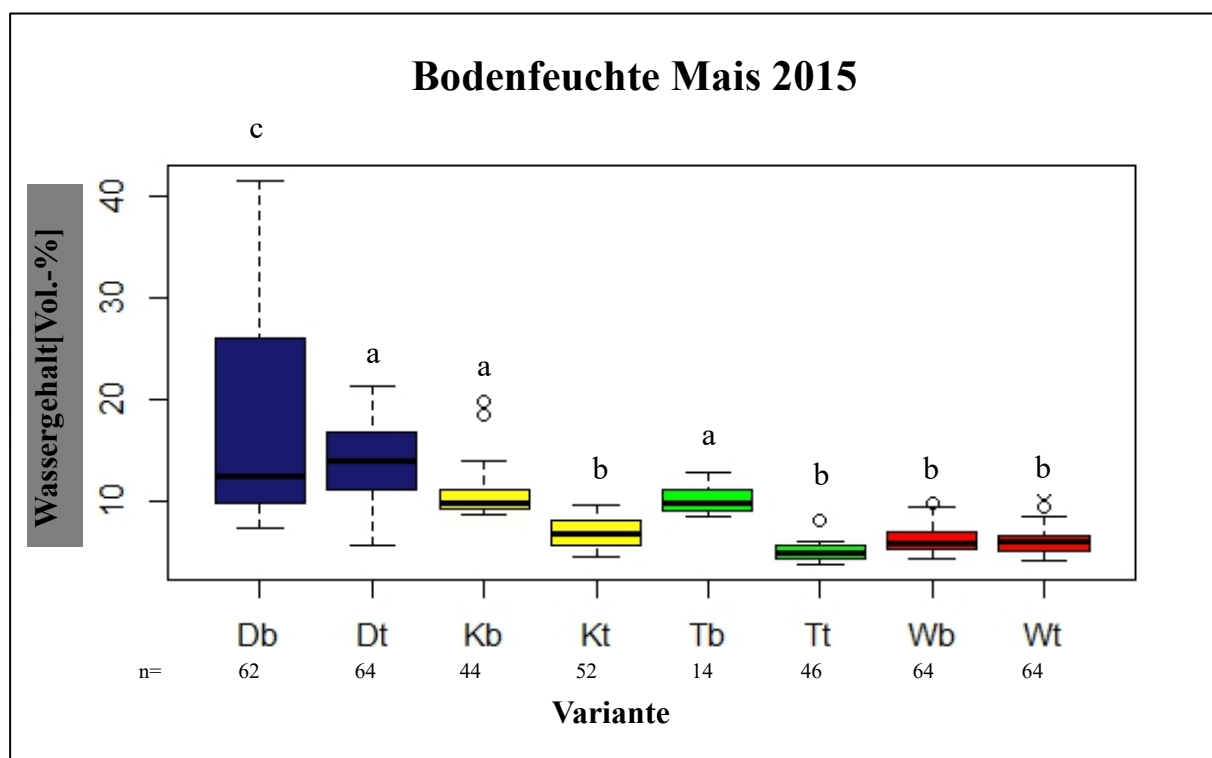


Abb. 34: VR 3 Boxplots der Bodenfeuchte [Vol.-%] der einzelnen Versuchsvarianten (b=bewässert; t=trocken=Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,1$

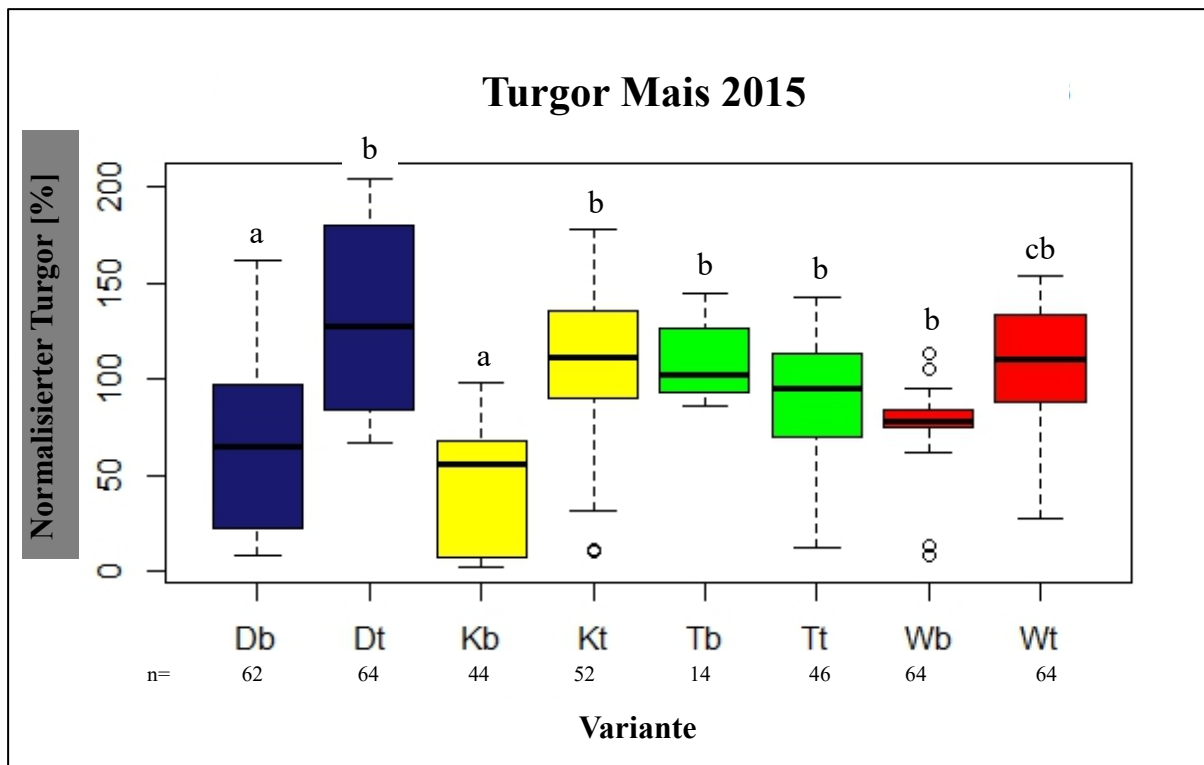


Abb. 35: VR 3 Boxplots der normalisierten Turgorwerte [%] (invers) der einzelnen Versuchsvarianten (b= bewässert; t= trocken= Wassermangelbedingungen); ANOVA; $\alpha=0,05$

Bei Betrachtung der gemittelten und normalisierten Turgorwerte zeigen sich signifikante Unterschiede bei den Pflanzen der bewässerten und der unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Varianten. Wie zu erwarten, weisen die Pflanzen der bewässerten Varianten, mit Ausnahme der der Birtreber, höhere Werte auf als die unter Wassermangelbedingungen gehaltenen. Allerdings konnten für Birtreber nur insgesamt 14 Messwerte betrachtet werden, sodass hier von einer hohen Fehlerwahrscheinlichkeit auszugehen ist (vgl. Abb. 35).

Weiterhin wurde wie bereits in VR 1 eine MLR durchgeführt, um die Beeinflussung des Turgors durch Eingangsparameter wie Bodenfeuchte, Lufttemperatur, Strahlung, Luftfeuchte und Längenwachstum zu identifizieren. Im Ergebnis zeigte sich, dass vor allem bei den Varianten unter Wassermangelbedingungen der Turgor hauptsächlich von der Bodenfeuchte und der Länge der Pflanzen abhängt und durch die Eingangsparameter zu 39% bis 90% erklärt werden kann (vgl. Tab. 17).

Tab. 17: VR 3 Mais 2015 Ergebnisse der MLR der unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Varianten (t= trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)

Variante	Multiple R-Squared	Hauptsächliche Einflussfaktoren ($\alpha > 0,05$)
Kontrolle t	0,7442	Länge, Luftfeuchte, Strahlung
Wolle t	0,3962	Länge, Bodenfeuchte
Treber t	0,8303	Länge, Bodenfeuchte, Lufttemperatur, Strahlung
Dünger t	0,9056	Länge, Lufttemperatur, Bodenfeuchte

Im Ergebnis der Diskriminanzanalyse kann festgehalten werden, dass die einzelnen Gefäße, unter Einbeziehung der Eingangsparameter Bodenfeuchte, normalisierter Turgor und Blattoberflächentemperatur, ähnlich wie in VR 1, mehrheitlich der jeweiligen Variante zugeteilt werden können. Eine Ausnahme bildet hier jedoch die Variante Kt. Demnach kann durch Auswertung der genannten Parameter eine Zuordnung einzelner Gefäße zu den entsprechenden Behandlungsvarianten vorgenommen werden. So kann geschlussfolgert werden, dass sich die Rohstoffe in ihrer Wirkung auf Boden und Pflanze schon bei geringen Aufwandsmengen signifikant unterscheiden.

Tab. 18: VR 3 Ergebnis der Diskriminanzanalyse mit den Eingangsparametern normalisierter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)

Variante	Db	Dt	Kb	Kt	Tb	Tt	Wb	Wt
Db	13	8	2	0	0	0	0	0
Dt	4	20	0	4	2	0	0	0
Kb	5	0	9	0	0	0	2	0
Kt	1	0	0	1	0	1	0	3
Tb	0	0	0	0	4	0	0	0
Tt	3	0	2	2	0	10	8	4
Wb	5	1	7	6	1	6	20	7
Wt	1	3	3	13	0	6	2	18

Für die Auswertung der Ernteparameter war es aufgrund der frühzeitigen Ernte, die in Folge der hohen Temperaturen von teilweise über 40 °C in der Gewächshauskabine bereits im BBCH-Stadium 32 erfolgte, nicht möglich, Parameter am Maiskolben zu betrachten. Demnach wurden lediglich Parameter am Maisstroh und Bodenparameter erhoben. Die höchsten Trockenmasseerträge (TM) wurden im Mittel durch die Pflanzen der bewässerten Düngervariante und die geringsten durch die der unter Wassermangelbedingungen stehenden Kontroll-

variante erreicht. Die Pflanzen der Varianten Biertreber und Rohwolle erreichten sowohl in der ausreichend bewässerten Variante als auch in der unter Wassermangelbedingungen stehenden Variante ähnliche Erträge der Trockenmasse. Da durch die beiden Düngervarianten der Mais ausreichend mit Nährstoffen versorgt wurde, ist davon auszugehen, dass durch die verbleibenden Varianten Rohwolle, Biertreber und Kontrolle den Pflanzen keine ausreichende Nährstoffzufuhr gewährleistet werden konnte, was sich bei den Kontrollen am extremsten ausgewirkt hat (vgl. Abb. 36). Bestätigt wird diese Annahme durch die Nährstoffanalysen des Bodens und des Pflanzenmaterials. So sind im Boden der Düngervarianten im Vergleich zu den anderen Varianten deutlich höhere Gehalte an Kalium, Phosphor und Magnesium nachweisbar. Die Analysen der Pflanzen bestätigen zudem, dass durch den NPK-Dünger aber auch durch Biertreber und Rohwolle pflanzenverfügbarer Stickstoff im Boden vorhanden war (vgl. Anhang A 15 und Anhang Tab. A 9).

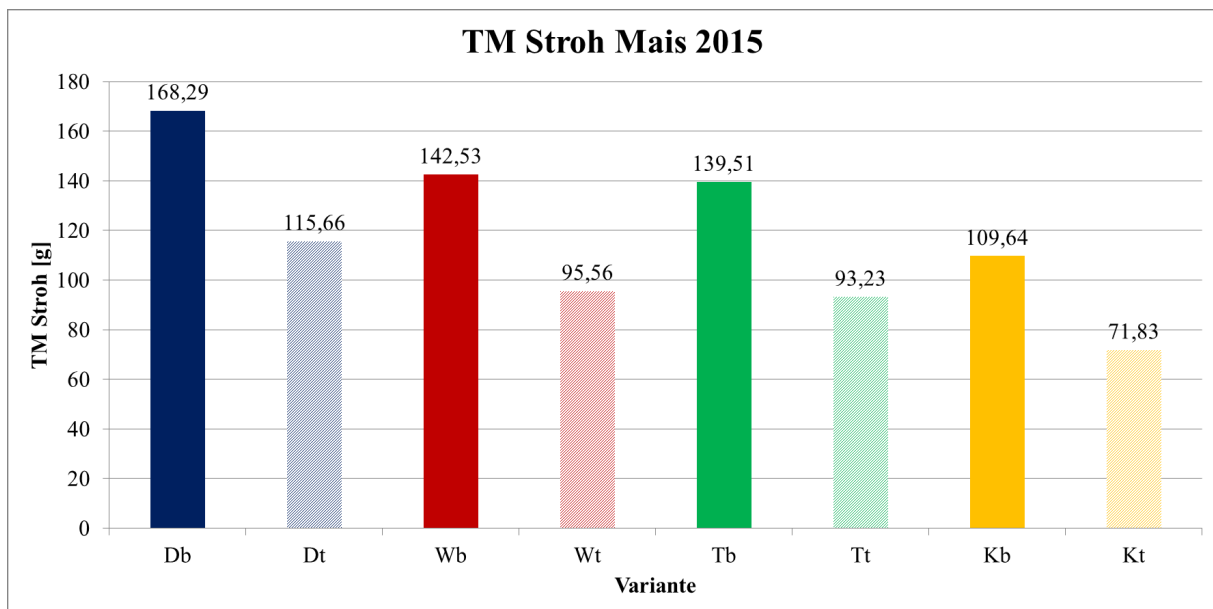


Abb. 36: VR 3 Mittlere Trockenmasse (TM) Stroh Mais 2015 (b=bewässert; t=trocken= Wassermangelbedingungen; n= 5)

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse von VR 1 und VR 2 in VR 3 bestätigen. Biertreber und Rohwolle führen eingemischt in ein sandiges Ausgangssubstrat zu einem verbesserten Pflanzenwachstum und höheren Trockenmassen im Vergleich zur Kontrolle. Dennoch sind die Erträge sowohl bei ausreichender Wasserversorgung als auch unter Wassermangelbedingungen nicht mit denen einer konventionellen Düngung vergleichbar.

6.4 Zwischenfazit Themenkomplex 2 (Gewächshausversuche)

Es zeigte sich, dass in den Gewächshausversuchen die Einbringung der Rohstoffe Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber in das Ausgangssubstrat sowohl unter Wassermangelbedingungen als auch mit ausreichender Bewässerung bei Mais als C₄-Pflanze und Weizen als C₃-Pflanze zu einer Verbesserung des Wachstums, der Entwicklung, der Vitalität und der Erträge im Vergleich zu den Kontrollgruppen ohne Beimengungen beitrug. Im Vergleich zu den mit NPK-Dünger behandelten Varianten lagen die Varianten der Schafwollpellets etwa auf dem gleichen Niveau bei den genannten Parametern. Hingegen wiesen die mit Rohwolle und Biertrebern behandelten Varianten geringfügig schlechtere Ergebnisse auf. Zwischen Mais und Weizen lassen sich in ihrer Reaktion auf die Rohstoffe Unterschiede feststellen. So kam es bei den Versuchen mit Mais nach relativ kurzen Zeitspannen auch bei ausreichender Versorgung der Pflanzen mit Wasser zu einer deutlichen Differenzierung im Längenwachstum und in den Entwicklungsständen nach BBCH-Codierung. Dieser Effekt verstärkte sich noch nach Induzierung der Wassermangelbedingungen. Für Weizen konnte nach einer vergleichsweise langen Zeitspanne nur ein Unterschied im Längenwachstum der Pflanzen der einzelnen Behandlungsvarianten festgestellt werden. Die Entwicklung nach BBCH-Codierung verlief sowohl bei ausreichender Wasserversorgung als auch unter Wassermangelbedingungen in den Gruppen ähnlich. Auch die erzielten Erträge von Stroh und Korn bestätigen die Beeinflussung der Pflanzen durch die Zugabe der Rohstoffe in das Ausgangssubstrat. So wurden durch Zugabe der Rohstoffe in allen Varianten höhere Erträge als bei den Kontrollen erzielt. Allerdings erreichten die Varianten Rohwolle und Biertreber nicht den Ertrag der mit Mineraldünger konventionell gedüngten Varianten. Diese waren aber in ihren Unterschieden zu Rohwolle und Biertrebern mit denen der Schafwollpellets vergleichbar. Für beide Pflanzkulturen lässt sich festhalten, dass die Schafwollpellets die stärkste Beeinflussung (vergleichbar mit der Mineraldüngervariante) hervorgerufen haben. Anhand der chemischen Analysen am Korn und der Ergebnisse zu Wachstum, Entwicklung und Vitalität ist zu erkennen, dass durch Schafwollpellets sowohl zu Beginn der Wachstumsperiode Nährstoffe insbesondere in Form von Stickstoff zur Verfügung gestellt werden als auch im weiteren Wachstumsverlauf bis zur Ernte. Biertreber und Rohwolle wirken ähnlich aber schwächer auf die genannten pflanzenbaulichen Parameter. Für Biertreber konnte anhand der Versuche mit Mais und Weizen festgestellt werden, dass, entgegen zu den Angaben in der Literatur, nicht erst ab Aufwandmengen von 2,5 M.-%, sondern in einem sandigen Ausgangssubstrat bereits ab 0,5 M.-% eine eindeutige Verbesserung des Wachstums, der Entwicklung aber auch der Erträge der hier genutzten

Pflanzen erreicht werden konnte. Zudem lässt sich anhand der pflanzenbaulichen Parameter erkennen, dass Biertreber vermutlich in relativ kurzer Zeit mineralisiert werden und Nährstoffe in Form von insbesondere Stickstoff zu Beginn der Wachstumsperiode zur Verfügung stehen. Für Rohwolle konnten die bereits in der Literatur genannten geringen Aufwandmengen von 0,1 M.-% auch für Mais und Weizen bestätigt werden. Weiterhin konnte unter den gegebenen Aufwandmengen der eingemischten Rohstoffe im Vergleich zu den Kontrollen eine deutliche Steigerung der Vitalität in Form höherer Chlorophyllgehalte festgestellt werden. Beim Mais lagen die SPAD-Werte der ausreichend bewässerten und der unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Pflanzen innerhalb einer Rohstoffvariante auf gleichem Niveau. Beim Weizen hingegen war der Rückgang mit zunehmendem Reifestadium bei den unter Wassermangelbedingungen gehaltenen Pflanzen deutlich stärker ausgeprägt als bei den ausreichend bewässerten. Am deutlichsten wurde das bei den Kontrollen. Da sich Wassermangel unter Nährstoffmangelbedingungen wesentlich stärker auswirkt, ist davon auszugehen, dass durch die Rohstoffe Nährstoffe insbesondere in Form von Stickstoff zur Verfügung gestellt wurden. Bei Trockenheit war das Nährstoffangebot aufgrund geringerer Mineralisierungsraten geringer. Dieser Effekt wirkt sich bei der Rohwolle aufgrund der in Themenkomplex 1 und durch die in diesem Kapitel nachgewiesenen langsameren Mineralisierungsraten stärker aus als bei den Biertrebern. Außerdem waren die Pflanzen, vor allem die der Kontrollgruppen, mit vermehrtem Nährstoffmangel kaum mehr in der Lage, den Wassermangel zu kompensieren. Bei Weizen als C₃-Pflanze wirkt sich dieser Aspekt aufgrund der geringeren WNE stärker aus als beim Mais als C₄-Pflanze. Eine Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit des verwendeten sandigen Substrates durch Zugabe der Rohstoffe ist schwierig zu identifizieren, da überlagernde Effekte, wie die unterschiedliche Zufuhr an Nährstoffen, die Biomasse, die Entwicklungsstände und Vitalität, einen starken Einfluss auf die Bodenfeuchte ausüben. So haben die Pflanzen der einzelnen Varianten in Abhängigkeit der genannten Faktoren unterschiedliche Mengen an Wasser während der Versuche verbraucht. Den höchsten Verbrauch hatten hierbei die Pflanzen, in deren Substrat Schafwollpellets eingemischt wurden. Dennoch sind hier die vergleichsweise geringsten Bodenfeuchten erzielt worden. Demnach ist davon auszugehen, dass das Bewässerungssystem zumindest für VR 1 als unzureichend anzusehen ist. Allerdings lässt sich aufgrund des Versuchsansatzes für Biertreber ein Effekt der Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens nachweisen. Trotz ähnlichem Wasserverbrauch, ähnlicher Biomasse und ähnlichen Entwicklungsständen wie bei den Pflanzen der Rohwolle, ließen sich in VR 1 sowohl für die ausreichend mit Wasser versorgten Gefäße als auch für die unter Wassermangelbedingungen gehaltenen im Mittel höhere Bodenfeuchten als bei denen der Roh-

wolle nachweisen. Aufgrund des fehlerhaften Versuchsansatzes mit mangelhafter Bewässerung und der genannten Überlagerungsfaktoren, kann für die verbleibenden Rohstoffe Schafwollpellets und Rohwolle im Gewächshausversuch keine Aussage über die Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit eines sandigen Substrates und deren Auswirkung auf die Bereitstellung pflanzenverfügbaren Wassers für Kulturpflanzen wie Weizen und Mais getroffen werden. Es war anhand statistischer Verfahren allerdings möglich, eine Beeinflussung des Turgors der Pflanzen durch die Zugabe der Rohstoffe in das Ausgangssubstrat nachzuweisen. Zudem lassen sich die einzelnen Varianten in ihren Bewässerungsvarianten zumeist eindeutig anhand der Eingangsparameter Turgor, Bodenfeuchte und Blattoberflächentemperatur klassifizieren.

7. Themenkomplex 3: Freilandversuche

7.1 Einleitung

Freilandversuche helfen bei der Einschätzung der Wirkungsweise von eingesetzten Bodenhilfsstoffen, Düngemitteln bzw. Bodenverbesserungsmitteln und erlauben eine Beurteilung dieser Stoffe unter möglichst realitätsnahen Praxisbedingungen. So lässt sich überprüfen, ob Resultate, die unter kontrollierten Gewächshausbedingungen erbracht wurden, auch unter Freilandbedingungen nachgewiesen werden können. Ausgehend von den Ergebnissen der Themenkomplexe 1 und 2 soll in diesem Kapitel untersucht werden, ob die gewonnenen Resultate für die Rohstoffe Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle auf Freilandbedingungen übertragbar sind. Zudem soll am Beispiel der Rohwolle geprüft werden, ob veränderte Ergebnisse in Wachstum, Entwicklung und Ertrag der Versuchspflanze Winterweizen (Sorte: Julius) zu erzielen sind, wenn von den in Themenkomplex 1 ermittelten Aufwandmengen abgewichen wird. Auch soll die Fragestellung beantwortet werden, ob die einmalige Einarbeitung der Rohstoffe Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle zu mehrjährig nachweisbaren Effekten an der Pflanze und im Boden führt. Weiterhin soll geklärt werden, ob sich durch die Zugabe von Rohwolle unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit vom Düngezeitpunkt ergeben. Der Einsatz von Schafwollpellets ist im landwirtschaftlichen Maßstab vergleichsweise teuer. Daher ist zu prüfen, ob das Einbringen aufbereiteter Schafwollpellets auch im Freiland zu den im Vergleich zur Rohwolle deutlich besseren Ergebnissen bei Wachstum, Entwicklung, Vitalität und Ertrag der gewählten Kulturen führt, die für die Gewächshausversuche in Themenkomplex 2 nachgewiesen werden konnten. Insgesamt wurden zwei Vegetationsperioden (VP) mit der Kulturfolge Winterweizen auf Sommerweizen untersucht. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen der Gewächshausversuche herzustellen, wurde bei den Freilandversuchen dieselbe Sorte Sommerweizen (KWS Chamsin) verwendet.

7.2 Material und Methoden

Für die Freilandversuche wurde das Versuchsfeld FU 7/8 mit einer Gesamtfläche von 720 m² genutzt. Eine Erhebung umfassender meteorologischer Parameter konnte über die Wetterstation des Versuchsstandortes⁹ erfolgen. Für die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Versuche wurden tagesgenaue Werte folgender Parameter abgefragt: Globalstrahlung (2 m), Lufttemperatur (min, max, mittel), Luftfeuchtigkeit und Niederschlag. Aus Kapazitätsgründen sind diese in dieser Arbeit nicht im Detail aufgeführt.

Tab. 19: Vegetationsperioden (VP) Freilandversuche mit den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten

VP	Pflanzenart (Sorte)	Anzahl der Versuchsfelder (Plots)	Getestete Rohstoffe (Varianten)	Untersuchungsschwerpunkte	Zeitraum
1	Sommerweizen (KWS Chamsin)	18	Schafwollpellets 0,5 M.-%, Birtreber 0,5 M.-%, Rohwolle 0,1 M.-%	1. Nachweisbarkeit der Wirkung unter praxisnahen Bedingungen 2. Ertragsunterschiede in Quantität und Qualität (Stroh und Korn) 3. Vergleichbarkeit zu Gewächshausversuchen 4. Identifizierung der Wirkung auf das Bodenleben abgeleitet aus der Bodenatmung	04.2014 bis 08.2014
2	Winterweizen (Julius)	24	In VP 1 eingebracht Schafwollpellets 0,5 M.-%, Birtreber 0,5 M.-%, Rohwolle 0,1 M.-% Neu in VP 2 eingebracht Rohwolle 0,1 M.-% Rohwolle 0,2 M.-%	1. Nachweisbarkeit der Wirkung unter praxisnahen Bedingungen 2. Nachhaltigkeit der Rohstoffe 3. Wirkung höherer Aufwandmengen Rohwolle 5. Ertragsunterschiede in Quantität und Qualität (Stroh und Korn)	09.2014 bis 07.2015

⁹ <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/agrarinet/service/wo> (Stand: 11.11.2016)

7.2.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsfläche wurde so geplant, dass insgesamt sechs Faktorstufen (Rohstoffe und ihre Konzentrationen sowie eine Kontrolle) in vierfacher Wiederholung in ihrer Wirkung untersucht werden konnten. Hierzu wurde die Versuchsfläche so vermessen, dass 24 Anlageparzellen sowie ein mittig liegender Erntestreifen entstanden sind. Jede Anlageparzelle (Plot) hatte eine Ausdehnung von 9 m x 3 m. Um Randeffekte durch Verschleppung der Rohstoffe während der Einarbeitung zu vermeiden, wurden die Düngeparzellen mit 12 m² in Abständen von 0,5 m und 1,5 m innerhalb der Anlageparzellen angelegt. Im Inneren der Düngeparzelle befanden sich die 9 m² großen Ernteparzellen. Die Parzellen wurden parallel zur Fahrtrichtung eingemessen (vgl. Anhang A 16). Die Verteilung der einzelnen Faktorstufen erfolgte in Form einer randomisierten Blockanlage. D. h., es wurden insgesamt vier Blöcke mit je sechs Parzellen angelegt, sodass in jedem Block jeder Faktor einmal vertreten war. Eine Übersicht über die Aufwandmengen (in kg) findet sich in Tab. 20. Die Parzellennummern setzen sich aus der Faktorstufe (erste Zahl) und der Wiederholung (zweite Zahl) zusammen. In die Parzellen 11-34 wurden ausschließlich im Frühjahr 2014 und in die Parzellen 41-54 nur im Herbst 2015 Rohstoffe eingebracht. Die Kontrollen 61-64 blieben über beide Vegetationsperioden unbehandelt.

Tab. 20: Versuchsvarianten (Faktoren) Freilandversuche mit Parzellennummern

Faktor mit Mengenangabe [M.-%]	Aufwandmenge je Plot [kg]	Parzellennummer
Schafwollpellets (Frühjahr 2014) 0,5	18,0	11, 12, 13, 14
Biertreber (Frühjahr 2014) 0,5	18,0	21, 22, 23, 24
Rohwolle (Frühjahr 2014) 0,1	3,6	31, 32, 33, 34
Rohwolle (Herbst 2014) 0,2	7,2	41, 42, 43, 44
Rohwolle (Herbst 2014) 0,1	3,6	51, 52, 53, 54
Kontrolle	-	61, 62, 63, 64



Abb. 37: Parzellengenaue Ausbringung der Rohstoffe (Foto: K. Garz 28.03.2014)

Zur Einarbeitung der Rohstoffe in ca. 0,2 m Tiefe wurde ein Pflug genutzt. Im Vorfeld wurden die Rohstoffe innerhalb der eingemessenen Düngeparzellen homogen verteilt (vgl. Abb. 37) und dann eingearbeitet. Die Aussaat des Sommerweizens (KWS Chamsin) erfolgte am 01.04.2014 mit einer Saatstärke von 400 Körnern pro m². Am folgenden Tag sind Netze über das frische Saatgut gelegt worden, um die Verluste durch Vogelfraß zu minimieren. Da das frisch aufgegangene Getreide nicht am Wachstum behindert werden sollte, wurden die Netze am 16.04.2014 vorsichtig abgenommen. Um den Vogelfraß der reifenden Körner erneut zu verhindern, wurden am 19.06.2014 wiederum Netze über das Versuchsfeld in ca. 2,5 m Höhe gespannt. Die Aussaat der Folgekultur Winterweizen der Sorte Julius (A) erfolgte am 08.10.2014 mit einer Saatstärke von 300 Körnern pro m². Auch hier wurde am Folgetag ein Netz gegen Vogelfraß auf das frische Saatgut gelegt und am 31.10.2014 wieder entfernt. Am 15.06.2015 wurden dann erneut die Netze in 2,5 m Höhe gegen Vogelfraß über das reifende Getreide gespannt.

7.2.2 Bonitur

Um vergleichbare und statistisch gesicherte Werte zu erhalten, wurden innerhalb der Ernteparzellen in den Saatreihen versetzt jeweils drei Meterenden abgesteckt. Innerhalb dieser Meterenden erfolgte die Bonitur auf Längenwachstum, Entwicklung nach BBCH-Codierung (Getreide) und Chlorophyllgehalt. Beim Längenwachstum und den Entwicklungsständen mussten 90% der betrachteten Einzelpflanzen die gleichen Werte aufweisen, damit diese für den ge-

samen Bestand des Plots als repräsentativ angesehen werden konnten. Für den Chlorophyllgehalt wurden an mindestens fünf Einzelpflanzen, die für den Bestand des Plots repräsentativ waren, zehn Messwerte erhoben, sodass aus den 50 ermittelten Werten der arithmetische Mittelwert berechnet werden konnte. Die methodische Durchführung zur Erhebung der einzelnen Parameter erfolgte analog zu den Gewächshausversuchen in Themenkomplex 2 (vgl. Kap. 6.2.2).

7.2.3 Ernte und Ernteaufbereitung

Zunächst wurden einen Tag vor der Gesamternte die Meterenden parzellenweise mit der Hand abgeerntet. Hierzu sind die einzelnen Pflanzen ca. 1 cm oberhalb des Bodens abgeschnitten worden. Die Ernte des restlichen Bestandes erfolgte für den Sommerweizen am 01.08.2014 und für den Winterweizen am 01.08.2015 mit dem Parzellenmähdrescher der Versuchsstation Dahlem. Das gedroschene Korn wurde zur Vermeidung von Schimmelbildung und Auskeimung aufgrund hoher Restfeuchtegehalte zunächst mehrere Tage mittels Warmluftgebläse in einen lagerungsfähigen Zustand gebracht. Ermittelt wurden folgende Parameter:

Frischmasse (FM) Stroh: Hierzu wurde das gesamte Stroh nach dem Dreschen auf dem Feld plotweise aufgefangen und vor Ort gewogen. Das Stroh aus den Meterenden wurde nach dessen Aufbereitung in seiner Masse hinzuaddiert.

Trockenmasse (TM) Stroh: Das Stroh wurde zunächst auf 1 cm bis 5 cm lange Stücke je Plot gehäckselt. Anschließend wurden drei repräsentative Unterproben von ca. 100 g eingewogen, die 24 h bei 105 °C getrocknet und dann erneut gewogen wurden. Aus dem Quotienten Nettoauswaage und -einwaage mal hundert ergibt sich der Trockensubstanzgehalt (TS) in %. Die Trockenmasse (TM) wird nach Gleichung 3 berechnet.

$$(3) \text{ TM (kg/Parzelle) } = \text{ TS}/100 * \text{FM}$$

Frischmasse (FM) Korn: Es wurde je Plot der gesamte Kornertrag zunächst am Tag der Ernte und erneut im Anschluss an die Lagerung unter Warmluftzufuhr gewogen. Die Körner aus den Meterenden wurden nach der Trocknung manuell im Feldlabor der Versuchsstation Dahlem gedroschen und deren Gewicht je Plot hinzuaddiert. Als Frischmasse gilt das Gewicht, das nach der Trocknung mittels Gebläse zur Herstellung der Lagerungsfähigkeit ermittelt wurde.

Trockenmasse (TM) Korn: Je Plot wurden etwa 60 g Korn eingewogen, für 24 h lang bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und anschließend rückgewogen. Die Berechnung erfolgt analog zur Trockenmasse Stroh.

Tausendkorngewicht: Hierfür wurden mit Hilfe einer Zählmaschine 1000 Körner je Plot abgezählt und anschließend gewogen.

Anzahl der Körner: Aus dem Tausendkorngewicht und dem Gesamtgewicht der Körner lässt sich die Gesamtzahl der Körner je Plot berechnen (4).

$TKG = \text{Tausendkorngewicht}$

$K_{ges} = \text{Gesamtgewicht der Körner je Plot}$

$$(4) x = \frac{1000 \times K_{ges} [g]}{TKG [g]}$$

Korngrößenverteilung: Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden 100 g der Körner je Plot eingewogen und durch eine Siebmaschine mit Sieben unterschiedlicher Maschenweiten (3 mm; 2,8 mm; 2,5 mm; 2,2 mm; 2,0 mm und < 2,0 mm) ihrer Größe nach getrennt. Die einzelnen Fraktionen wurden anschließend gewogen, sodass deren Anteil an der Gesamteinwaage berechnet werden konnte.

Chemische Analyse: Im Vorfeld der chemischen Analysen wurden Stroh und Korn 24 h lang bei maximal 60 °C getrocknet und anschließend mit einer Hammermühle staubfein zermahlen. Es folgten die Analysen der in Tab. 21 aufgeführten Parameter nach den im Anhang in Tab. A 4 genannten Methoden.

Tab. 21: Analytierte Parameter in Stroh und Korn Freilandversuche

Vegetationsperiode (VP)	Analytierte Parameter in Stroh und Korn
1. Sommerweizen	CN, P, K, Mg, Ca, Rohprotein (Rp)
2. Winterweizen	CN, Rohprotein (Rp)

7.2.4 Bodenproben

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte pro Plot an fünf verschiedenen Stellen in einer Tiefe von 0 – 25 cm. Je Plot ist anschließend eine Mischprobe hergestellt worden, die in Doppelbestimmung auf die in Tab. 22 aufgelisteten Parameter analysiert wurde. Für die Bodenprobenentnahme zur Bestimmung der C/N-Verhältnisse und der pH-Werte wurde ein N_{min}-Stecher genutzt. Pro Plot wurden mindestens zehn Einstiche gemacht, aus denen in Abhängigkeit von

den Tiefen in cm (0-10; 10-20; 20-30 und 30-50) und den Horizonten Mischproben hergestellt wurden.

Tab. 22: Am Bodensubstrat erhobene Parameter in den Vegetationsperioden nach der Ernte

Vegetationsperiode (VP)	Erhobene Parameter aus dem Bodensubstrat
1. Sommerweizen	P_{DL} , K_{DL} , Mg_{CaCl_2} , C_{org} , C/N, pH-Wert, Bodenatmung, Wasserretention (pF), TRD
2. Winterweizen	P_{DL} , K_{DL} , Mg_{CaCl_2} , C_{org} , C/N, pH-Wert, Bodenatmung, TRD

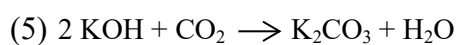
Die chemischen Parameter P_{DL} , K_{DL} , Mg_{CaCl_2} , C_{org} , CN und pH-Wert wurden nach den im Anhang in Tab. A 4 genannten Methoden ermittelt. Für die Bestimmung der Wasserretention und die der Trockenrohdichten (TRD) findet sich eine ausführliche Erläuterung zur Methodik in Kap. 5.4.5.

Bodenatmung: Die Bodenatmung (Respiration) beschreibt den Prozess im Boden, bei dem zur Aufrechterhaltung der biologischen Aktivität des Bodens Sauerstoff durch Bodentiere, Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen verbraucht und CO_2 freigesetzt wird. Den größten Anteil an der CO_2 -Produktion haben mit bis zu 2/3 die Mikroorganismen. Der Sauerstoff wird durch die Bodenorganismen benötigt, um Kohlenhydrate zu oxidieren, damit diese die für das Wachstum wichtige Energie liefern können. Am höchsten ist der Sauerstoffbedarf im Oberboden in den Bereichen, in denen sich die meisten Mikroorganismen, Wurzeln und Bodenlebewesen befinden. Abhängig ist die Respirationsrate von der Temperatur, dem Gehalt an organischer Substanz, dem Bodenwassergehalt und dem Nährstoffgehalt (ROWELL, 2013).

Zur Bestimmung der Bodenatmung wurden nach der Ernte des Sommerweizens und des Winterweizens Stechzylinderproben entnommen. Beprobt wurde je Plot in den Tiefen 10 cm bis 20 cm und 20 cm bis 30 cm mit jeweils fünf Wiederholungen. Der Wassergehalt aller Stechzylinderproben wurde auf einen pF-Wert von 2,0 eingestellt (Methodik vgl. Kap. 5.4.5). Die Messung der Bodenatmung erfolgte über den Carbo2Bot. Hierbei handelt es sich um Messtechnik des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP), welches in Kooperation mit dem Gemeinschaftslabor Analytik des Albrecht Daniel Thaer – Instituts der Lebenswissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin betrieben wird¹⁰. In Vorbereitung auf die Messungen wurden die Proben

¹⁰ <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/pressmit/pressarchiv/archiv12/120213> (Stand: 13.11.2016)

in den Stechzylindern in die luftdicht verschließbaren Gefäße des CarbO2Bot gegeben. Innerhalb des großen Probengefäßes befindet sich ein kleineres, welches mit 10 ml Kalilauge gefüllt wird und in dem sich Platinelektroden befinden. Diese Elektroden messen die Veränderung der Leitfähigkeit in der Kalilauge über die Zeit. Mit zunehmendem CO₂ – Gehalt im Gefäß findet eine chemische Reaktion statt, bei der Kaliumcarbonat und Wasser entstehen (vgl. Gleichung 5). Infolgedessen kommt es zu einem Rückgang der gemessenen Leitfähigkeiten. Da die Ionenkonzentration linear zur Menge des absorbierten CO₂ abnimmt (SMIRNOVA et al., 2014), kann hieraus unter Berücksichtigung der Zeit die Atmungsrate in [$\mu\text{g CO}_2 \text{ (h} \cdot \text{g Boden)}^{-1}$] abgeleitet werden.



Gemessen wurde je Durchgang 40 – 50 h lang bei konstant 20 °C. Nach ca. 10 h ist eine stabile Atmungsrate erreicht worden. In Auswertung der Ergebnisse sind die Atmungsraten jeweils auf die Trockenrohdichten in [g cm^{-3}] bezogen worden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit in R (3.2.2) generierten Boxplots.

7.2.5 Statistische Bewertung der Ergebnisse (Clusteranalyse)

Die Clusteranalysen wurden mit R (3.2.2) durchgeführt und mittels Dendrogrammen dargestellt. Durch die Clusteranalyse sollen Gruppen anhand ausgewählter Merkmale gebildet werden, deren Eigenschaften innerhalb eines Clusters (Gruppe) möglichst homogen sind. Zwischen den einzelnen Gruppen soll die Merkmalsausprägung möglichst heterogen sein. Im Vorfeld der Clusteranalyse wurden die Daten standardisiert, auf Ausreißer überprüft und diese gegebenenfalls eliminiert. Es ist das agglomerative hierarchische Verfahren angewendet worden. Hierbei stellt zu Beginn des Prozesses jedes Objekt ein einzelnes Cluster dar. Im Verlauf werden die Objekte mit den geringsten Distanzen zu Gruppen (Clustern) zusammengefasst. Zur Berechnung der euklidischen Distanzen wurde das Ward-Verfahren genutzt. Dieses Verfahren berechnet nicht direkt die Distanzen zwischen Objekten, sondern ermittelt diejenigen Objekte, die die Varianz eines Clusters am wenigsten erhöhen. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt durch Dendrogramme, wobei die einzelnen Fusionsschritte bis zur gewünschten Clusterzahl grafisch dargestellt werden (HOFFMANN und RÖDEL, 2004). Die Clusterzahl wurde im Vorfeld in der Regel durch die Anzahl der Faktorstufen des Versuchsansatzes gewählt, um die einzelnen Plots anhand ihrer Eigenschaften den Gruppen zuordnen zu können. Zur Realisierung der Berechnung in R (3.2.2) wurde mit der Funktion *hclust(...)*, *method=ward.D2* gearbeitet (PETZOLDT, 2009).

7.3 Ergebnisse und Diskussion

Analog zu den Gewächshausversuchen in Themenkomplex 2 erfolgt die Darstellung der Ergebnisse mit den entsprechenden Diskussionen getrennt nach den Vegetationsperioden für Sommerweizen (2014) und Winterweizen (2015). Ursächlich sind auch hier die in Tab. 19 aufgelisteten differenzierten Untersuchungsschwerpunkte.

7.3.1 Sommerweizen (2014)

Die Aussaat des Sommerweizens (SW) erfolgte am 01.04.2014. Im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1981 bis 2010 waren die Monate Januar 2014 bis April 2014 deutlich zu trocken, sodass die Wachstumsbedingungen zu Beginn der Versuche aufgrund des Wassermangels relativ ungünstig waren. Ausgeglichen wurden die fehlenden Niederschläge in den Monaten Mai 2014 bis Juli 2014, die im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich zu nass waren (vgl. Abb. 2).

Im Vergleich zur VR 2 der Gewächshausversuche in Themenkomplex 2 (vgl. Kap. 6.3.2) waren bei der Entwicklung und dem Längenwachstum der Pflanzen ähnliche Effekte zu erkennen. Zwischen den einzelnen Plots zeigten sich demnach während der Vegetationsperiode (VP) keine signifikanten Unterschiede in der Entwicklung nach BBCH-Codierung (vgl. Anhang Tab. A 10). Im Gegensatz dazu wiesen die Plots mit Schafwollpellets, Rohwolle und Biertreber ein im Vergleich zur Kontrolle höheres Längenwachstum auf. Der Unterschied wird bei einer durchschnittlichen Pflanzenhöhe aller Varianten von ca. 30 cm und nach ca. einem Monat Wachstumsdauer deutlich. Bis zum Zeitpunkt der Ernte betrug der Längenunterschied der Pflanzen zwischen den Plots mit eingebrachten Rohstoffen und der Kontrolle ca. 5 cm (vgl. Abb. 38).

Auch die Chlorophyllgehalte sind mit denen der Gewächshausversuche (VR 2) vergleichbar (vgl. Kap. 6.3.2). So wiesen die Pflanzen der Kontrollen bis zur beginnenden Abreife im Mittel geringere Chlorophyllgehalte auf als die Pflanzen der Plots mit eingebrachten Rohstoffen. Im Vergleich der Faktoren untereinander zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede der SPAD-Werte (vgl. Abb. 39).

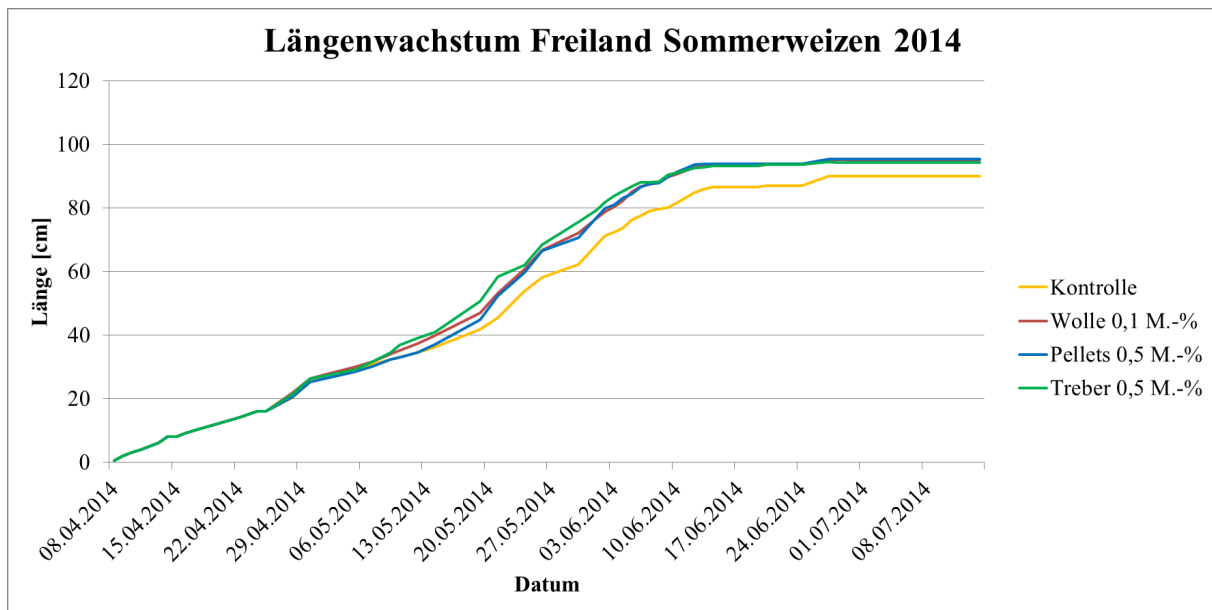


Abb. 38: VP 1 Mittleres Längenwachstum Sommerweizen 2014; n= 40

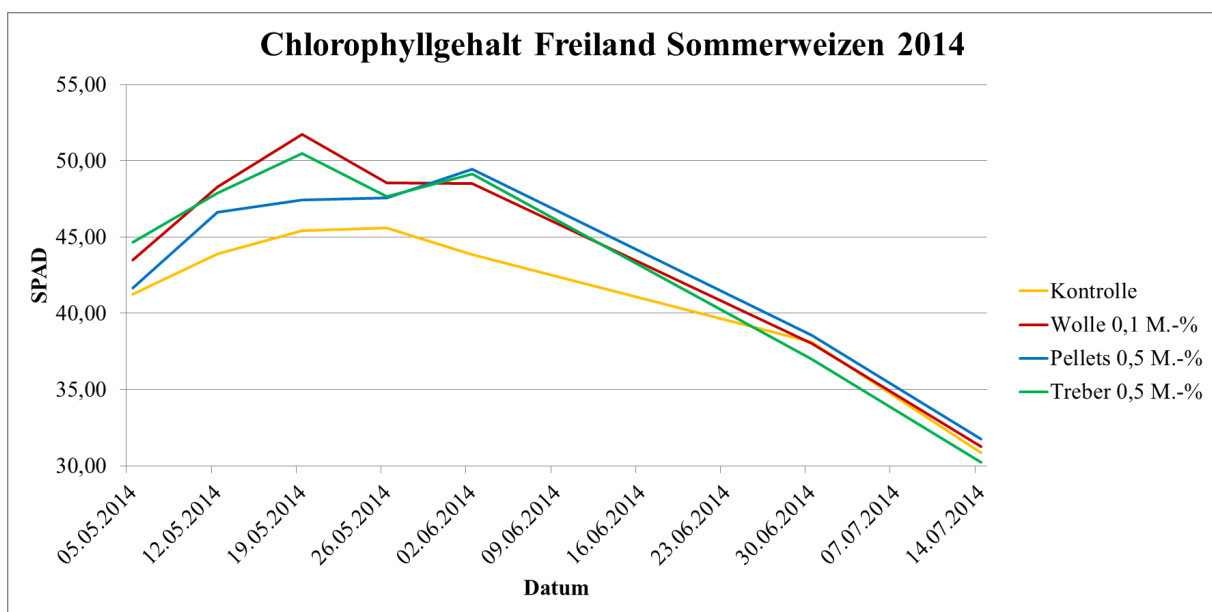


Abb. 39: VP 1 Mittlerer Chlorophyllgehalt Sommerweizen 2014; n= 40

Anhand der Parameter Entwicklung, Längenwachstum und Vitalität kann wie auch in den Gewächshausversuchen (Kap. 6) davon ausgegangen werden, dass durch die Einarbeitung der Rohstoffe in den Boden und deren anschließende Mineralisierung pflanzenverfügbare Nährstoffe insbesondere in Form von Stickstoff freigesetzt wurden. Stickstoff stellt einen grundlegenden Makronährstoff für das Wachstum, die Entwicklung und die Vitalität von Pflanzen dar (MENGEL et al., 2001). Dieser wurde in den Plots der Kontrollen nur in unzureichenden Men-

gen zur Verfügung gestellt, was bei den Pflanzen zu einem vergleichsweise verminderten Längenwachstum und insbesondere zu geringeren SPAD-Werten geführt hat.

Aufgrund eines technischen Defektes an der Erntemaschine musste die Ernte der Plots 12 und 31 verworfen werden. Da allerdings die Meterenden im Vorfeld geerntet werden konnten, war es möglich, die im Anhang in Tab. A 11 rot gekennzeichneten Werte für den gesamten Plot abzuleiten. Wie in Themenkomplex 2, VR 2 bereits festgestellt wurde, wird die durchschnittliche Anzahl der Körner pro Ähre ab dem Schossbeginn und das Korngewicht zum Zeitpunkt des Ährenschiebens in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung festgelegt (KNITTEL, 2003). Es wurde in den Gewächshausuntersuchungen lediglich festgestellt, dass die Ährengewichte der behandelten Varianten über denen der Kontrolle lagen (vgl. 6.3.2). In Auswertung des Freilandversuches Sommerweizen lassen sich detailliertere Aussagen treffen. So wiesen die Pflanzen der mit Schafwollpellets und mit Biertreber behandelten Plots mit durchschnittlich 34 die meisten Körner pro Ähre auf. Durch die Zugabe von Rohwolle und bei den Kontrollen konnten im Mittel nur 32 bzw. 31 Körner je Ähre ausgebildet werden (vgl. Anhang Tab. A 11). Daher ist davon auszugehen, dass durch die Mineralisierung der Schafwollpellets und der Biertreber ab dem Beginn des Schossens, welches ca. am 06.10.2014 einsetzte, größere Mengen an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden vorhanden waren. Bei der Rohwolle bestätigt sich erneut deren langsame Mineralisierungsrate, sodass zu diesem Zeitpunkt im Vergleich zur Kontrolle kaum mehr Nährstoffe zur Verfügung gestanden haben können. Das aus dem Tausendkorngewicht (TKG) abgeleitete Korngewicht ist hingegen durch alle Rohstoffe im Vergleich zur Kontrolle deutlich erhöht worden. Dabei erzielten die Pflanzen der mit Schafwollpellets behandelten Plots im Mittel die höchsten und die der Kontrollen die geringsten TKG. Auffallend ist, dass durch die eingebrachte Rohwolle im Mittel höhere TKG erzielt wurden als durch die Biertreber. Geringe TKG bei vergleichsweise hohen Erträgen (vgl. Abb. 40, Biertreber) treten dann auf, wenn im Frühjahr eine hohe Stickstoffgabe erfolgte oder wenn zum Zeitpunkt der Kornausbildung Stickstoffmangel eingetreten ist (FOIS et al., 2009). So kann davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt des Ährenschiebens und der Kornbildungsphase durch die Biertreber vergleichsweise wenige und zu Beginn der Wachstumsperiode im Frühjahr vergleichsweise viele Nährstoffe zur Verfügung gestellt wurden. Wie bereits in den Kapiteln 5.4.1 und 5.4.2 festgestellt wurde, hat sich bestätigt, dass Biertreber schnell mineralisiert werden und daher keine langfristige Düngewirkung aufweisen. Für die Rohwolle ist im Gegensatz dazu anhand der hohen TKG ableitbar, dass eine langsamere Mineralisierung und Freisetzung an Nährstoffen stattfindet, was sich insbesondere im späteren Wachstumsverlauf positiv auch auf Ertragsparameter auswirkt. So konnten trotz geringerer

Körneranzahl pro Ähre durch die hohe Anzahl an Ähren pro m² und das hohe TKG ähnliche Erträge erzielt werden wie bei den mit Schafwollpellets behandelten Plots (vgl. Abb. 40 und Anhang Tab. A 11). Bei den aufgeführten Ernteparametern lassen sich zwischen den Plots innerhalb einer Variante größere Standardabweichungen (SD) feststellen (vgl. SD im Anhang in Tab. A 11 und Fehlerbalken in Abb. 40). Diese lassen sich zum einen durch Fehler bei der Aussaat, Ernte oder Ernteaufbereitung erklären und zum anderen durch die Heterogenität des Versuchsstandortes. Insbesondere seien hier die im Versuchsfeld stark schwankenden Horizontmächtigkeiten unterhalb des Ap-Horizontes genannt (vgl. Abb. 5), aber auch mikroklimatische Effekte könnten hierbei eine Rolle gespielt haben. So befindet sich am südöstlichen Bereich des Versuchsfeldes ein Schuppen (vgl. Abb. 37), der durch Beschattungseffekte zu einer unterschiedlichen Erwärmung des Bodens und zu kleinräumig unterschiedlichen Niederschlagsmengen geführt haben kann.

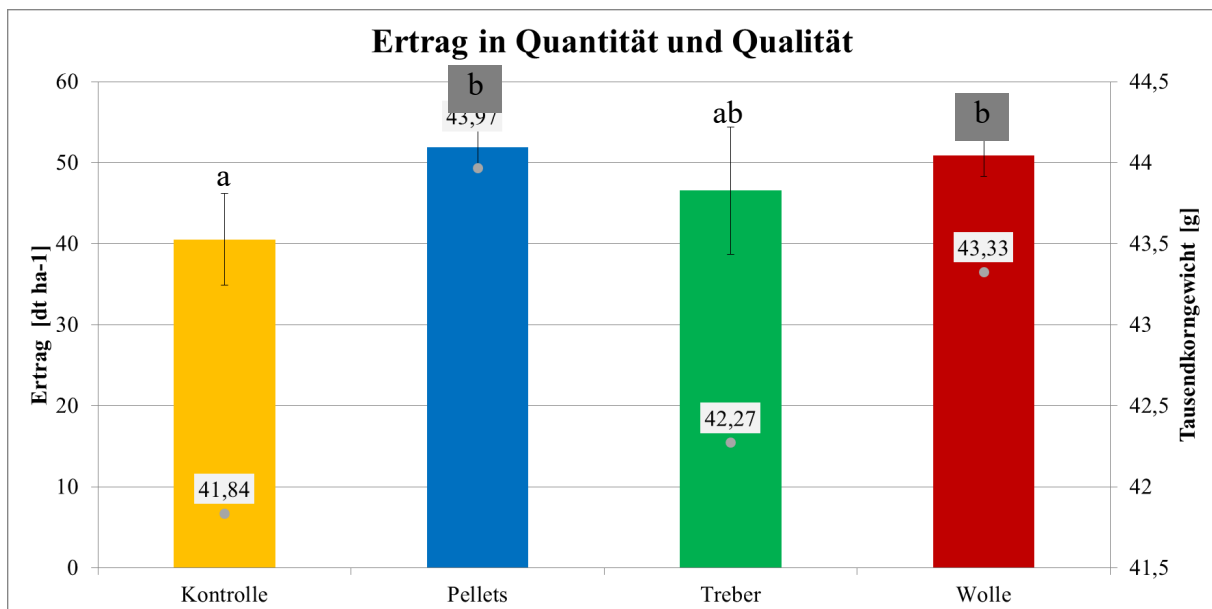


Abb. 40: VP 1 Qualitative und quantitative Ertragsparameter Sommerweizen 2014; n = 4; $\alpha = 0,05$

Im Anschluss an die Ernte des Sommerweizens am 01.08.2014 wurden chemische Analysen am gemahlenen Korn der Pflanzen der einzelnen Plots durchgeführt (vgl. Tab. 23). Normalerweise ist der Rohproteingehalt negativ mit dem Ertrag korreliert (KÜBLER, 1994), was anhand der durchgeführten Versuche nicht bestätigt werden kann (vgl. Abb. 40 und Tab. 23). Hier wurden die höchsten Rohproteingehalte bei den Pflanzen der mit Schafwollpellets und Rohwolle behandelten Plots festgestellt. Der inverse Zusammenhang ist bei hohen Stickstoffgaben und insbesondere bei einer Stickstoffverfügbarkeit in der späten Wachstumsphase nicht mehr vorhanden (FEIL und BÄNZIGER, 1999). Daher ist davon auszugehen, dass vor allem

durch die Mineralisation große Mengen an Stickstoff durch die Schafwollpellets und die Rohwolle und in geringerem Umfang auch durch die Biertreber zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 23: VP 1 Chemische Analysen Korn SW 2014; n= 4

Variante [M.-%]	TS	N	C	C/N	Rohproteingehalt
	[%]	[% TM]	[% TM]		[% TM]
Pellets 0,5	92,44	2,26	36,73	16,24	12,90
Treber 0,5	92,16	2,03	37,19	18,49	11,57
Wolle 0,1	92,20	2,15	37,50	17,58	12,25
Kontrolle	92,00	1,80	36,85	20,69	10,26

Die ebenfalls nach der Ernte durchgeführten Bodenprobenanalysen bestätigen, dass in den Substraten der Plots mit Zugabe der Rohstoffe größere Mengen an mineralischem Stickstoff, (N_{\min}) insbesondere in Form von Nitrat, vorhanden waren als bei den Plots der Kontrolle (vgl. Tab. 24). Daher kann hier von einer guten Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff ausgegangen werden, was durch die Parameter der Bonitur und der Ernte bestätigt wird.

Tab. 24: VP 1 Chemische Analysen Boden SW 2014; n= 4

Variante [M.-%]	C _{org}	Mg _{CaCl2}	K _{DL}	P _{DL}	C _{Ges}	N _{Ges}	C/N	NH ₄	NO ₃	pH-Wert
	[%]	[mg/100g]			[%]	[%]		[mg NH ₄ -N l ⁻¹]	[mg NO ₃ -N l ⁻¹]	
Pellets 0,5	1,13	5,87	11,70	31,17	1,46	0,12	12,30	0,30	2,36	6,10
Treber 0,5	1,17	5,61	11,94	30,54	1,41	0,11	13,12	0,29	2,65	6,22
Wolle 0,1	1,14	5,64	8,75	30,14	1,42	0,11	12,60	0,32	1,78	6,25
Kontrolle	1,10	5,86	8,82	29,01	1,50	0,11	13,98	0,30	1,58	6,14
Standort 2013		6,27	10,60	35,30						6,27

Durch Einbringung der Rohstoffe kommt es weiterhin zu einer nachweislichen Verengung der C/N-Verhältnisse in der relevanten Tiefe zwischen 10 cm bis 30 cm. Das spricht ebenfalls für eine gute Stickstoffverfügbarkeit der Pflanzen. Bei der Kontrolle ist hingegen über die Zeit kaum ein Effekt zu erkennen (vgl. Abb. 41 und Abb. 42).

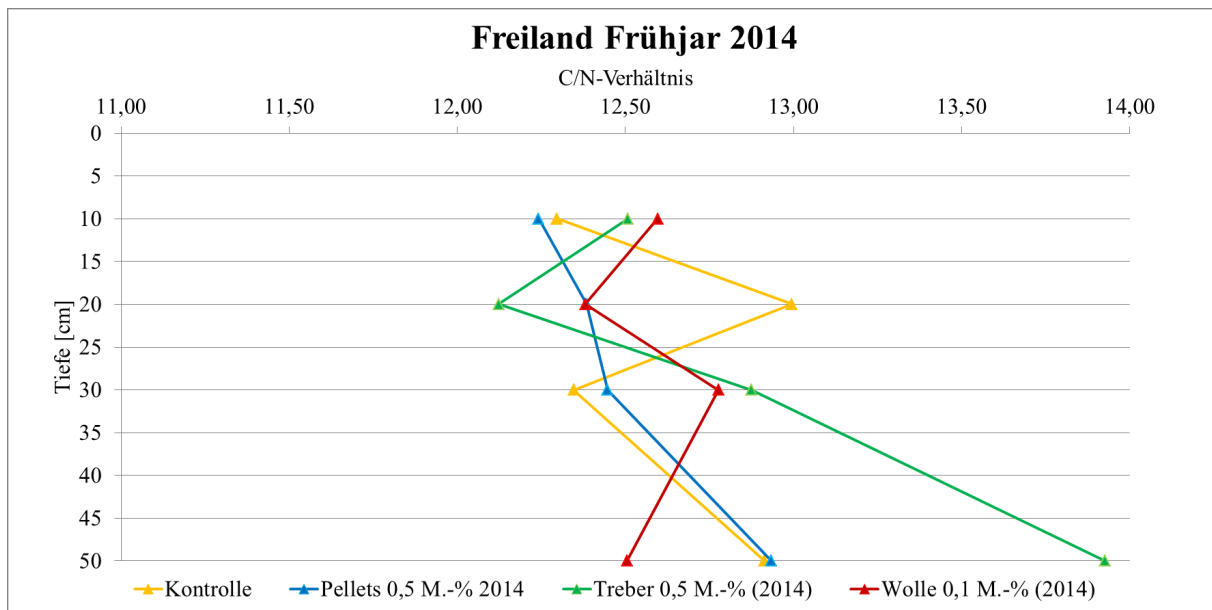


Abb. 41: Tiefenprofil C/N-Verhältnis vor Einarbeitung der Rohstoffe Frühjahr 2014; n = 8

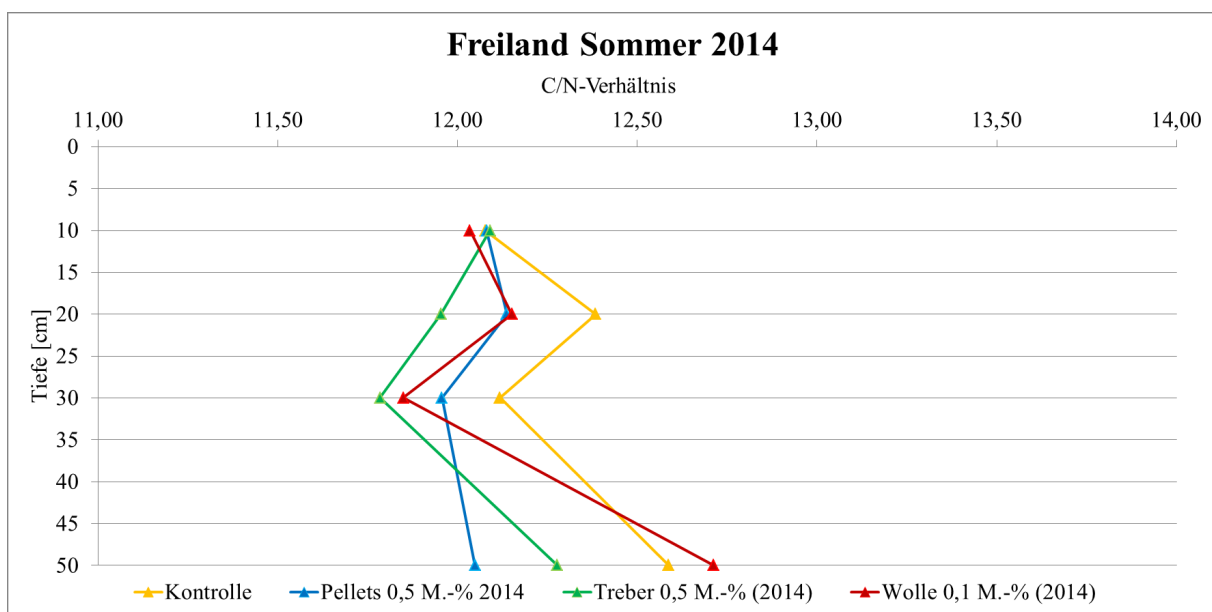


Abb. 42: Tiefenprofil C/N-Verhältnis nach der Ernte Sommerweizen (VP 1) Sommer 2014; n = 8

In Tab. 25 sind die theoretisch möglichen Nährstoffmengen, die bei angenommener vollständiger Mineralisierung der Rohstoffe den Pflanzen zur Verfügung stehen können, dargestellt. Auch hier bestätigt sich der hohe potentiell mögliche Eintrag von Stickstoff durch die Schafwollpellets, Biertreber und Rohwolle. Kalium würde für Weizen bei einem angenommenen Ertrag von 50 dt ha^{-1} (vgl. hierzu auch die Realerträge der einzelnen Plots im Anhang in Tab. A 11) vor allem durch Schafwollpellets und Rohwolle bei vollständiger Mineralisierung zur Verfügung stehen. Biertreber liefern hier vergleichsweise geringe Mengen. Dennoch wiesen

die Bodenproben (2014) der Plots mit Schafwollpellets und Biertrebern ähnlich hohe Kaliumwerte auf, die auch über dem Ausgangswert von 2013 lagen. Die Plots der Rohwolle hingegen wiesen nur Werte im Bereich der Kontrollflächen auf, die jeweils unter dem Ausgangswert von 2013 lagen. Hier kann von einer Zehrung der bereits im Vorfeld der Versuchsanordnung noch im Boden vorhandenen Kaliumgehalte gesprochen werden. Im Vergleich aller Varianten waren die Magnesiumgehalte in etwa auf dem gleichen Niveau, lagen allerdings unter dem Ausgangswert von 2013. Da die Magnesiumgehalte für einen Ackerstandort mit lehmigem Sand bereits im Vorfeld als hoch einzustufen sind (LWK NRW, 2015), war dies kein limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum. In Abhängigkeit vom pH-Wert und von der Korngröße kann nur eine bestimmte Menge austauschbares Magnesium im Boden gebunden werden (SCHEFFER et al., 2013). Die Gehalte nach der Wachstumsperiode lagen 2014 in allen Plots trotz unterschiedlicher Zufuhr durch die Rohstoffe etwa auf demselben Niveau. In Verbindung mit den hohen Sommerniederschlägen kann davon ausgegangen werden, dass das überschüssige Magnesium aus dem Boden ausgewaschen wurde. Ähnliches lässt sich auch für die Phosphorgehalte feststellen, die im Vorfeld ebenfalls für diesen Standort bereits auf einem sehr hohen Niveau lagen (LWK NRW, 2015).

Tab. 25: Nährstoffeintrag in den Boden bei angenommener vollständiger Mineralisierung der Rohstoffe und beispielhaftem Nährstoffentzug durch Weizen

Aufwandmenge	Variante [M.-%]	Ca	K	Mg	P	N
[t ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]				
15	Schafwollpellets 0,5	70	592	22	18	1.698
15	Biertreber 0,5	76	20	60	130	554
3	Rohwolle 0,1	2	106	0,7	2	368
Nährstoffentzüge bei einem Ertrag von 50 dt ha⁻¹*						
Weizen		-	85	12	24	210-230

* <http://www.effizientduengen.de/files/entzugsrechner.php> (Stand: 15.11.2016)

Insgesamt weist der Vergleich der potentiellen Nährstoffeinträge anhand der Aufwandmengen in Tab. 25 mit den gemessenen Nährstoffgehalten in Boden und Pflanze (vgl. Tab. 23 und Tab. 24) auf eine schnelle Mineralisierung der Biertreber hin, die mit Nährstoffverlusten durch Auswaschungsprozesse einhergehen. Außerdem bestätigen die Werte eine langsame Mineralisierung der Schafwollpellets und der Rohwolle, wodurch Verluste durch Auswaschungen im Vergleich zu den Biertrebern verringert werden.

Die bodenphysikalischen Kenngrößen Wasserretention und Trockenrohdichte (TRD) zeigen in der Tiefe von 10 cm bis 20 cm eine nachweisbare Beeinflussung durch die eingebrachten Rohstoffe Schafwollpellets und Rohwolle.

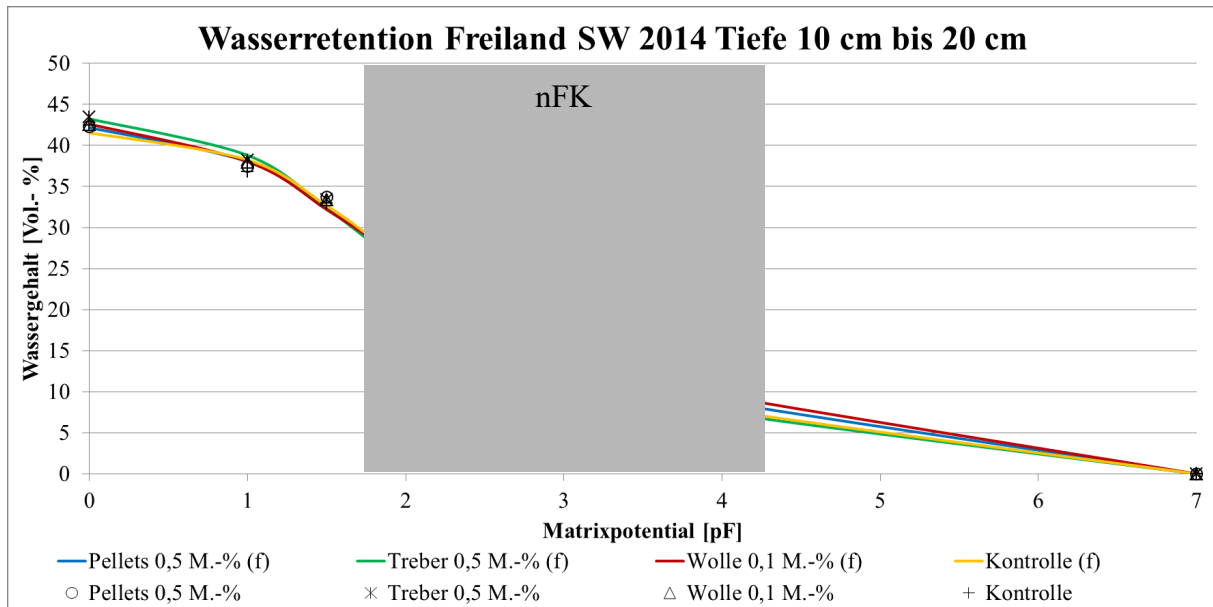


Abb. 43: VP 1 gefittete Wasserspannungskurven (f) und Originalwerte Freiland Sommerweizen nach Ernte in 10 cm bis 20 cm Tiefe; n= 20

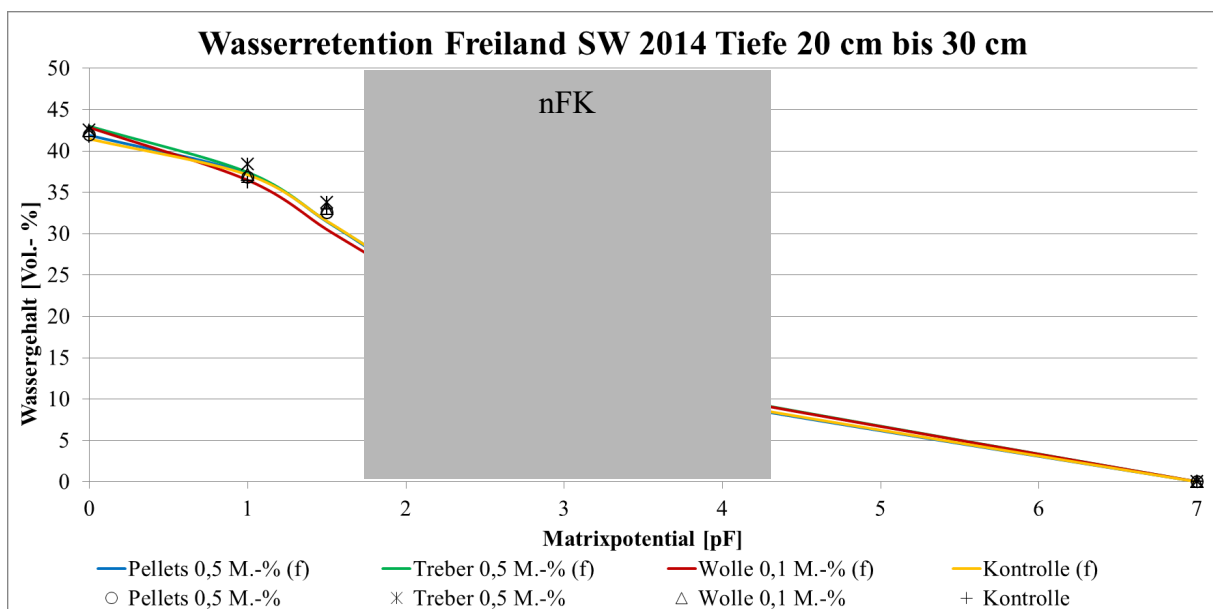


Abb. 44: VP 1 gefittete Wasserspannungskurven (f) und Originalwerte Freiland Sommerweizen nach Ernte in 20 cm bis 30 cm Tiefe; n= 20

In Abb. 43 ist zu erkennen, dass durch die Einarbeitung dieser beiden Rohstoffe in den Boden im Bereich der nFK eine höhere Wasserspeicherfähigkeit erreicht wurde als bei der Kontrolle.

In der größeren Tiefe von 20 cm bis 30 cm ist dieser Effekt nicht mehr nachweisbar (vgl. Abb. 44). Demnach kann für die Rohwolle die in den Vorversuchen bereits festgestellte Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit (vgl. 5.4.5) nach einer längeren Verweildauer im Boden auch in den Freilandversuchen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse von KADAM (2014) können auch unter der Angabe konkreter Aufwandmengen bestätigt werden. In diesen Versuchen wurde Wolle in nicht näher genannten Aufwandmengen in Form von Staub, Matten und Filz in den Boden eingebracht, was ebenfalls zu einer nachgewiesenen Erhöhung der Bodenfeuchten im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrollfläche geführt hat. Bei der Zugabe von Schafwollpellets war es aufgrund ihres enormen Quellvermögens und der damit einhergehenden Auflockerung des Bodens sowie der Zunahme an Makroporen in den Vorversuchen nicht möglich, die Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens nachzuweisen (vgl. 5.4.5). Dennoch kann die bereits aufgestellte Vermutung bestätigt werden, dass es nach Setzung des umliegenden Bodenmaterials auch durch die Zugabe der Schafwollpellets zu einer Erhöhung des Wasserspeichervermögens des Bodens kommt. Für Biertreber konnte die in den Vorversuchen festgestellte Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit (vgl. 5.4.5) in den Freilandversuchen hingegen nicht nachgewiesen werden. Ebenso wie die im Vorfeld ausgewerteten Ernteergebnisse und chemischen Bodenanalysen lassen auch die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserretention darauf schließen, dass Biertreber im Boden zügig zersetzt werden und daher auch ihre Fähigkeit, die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens zu erhöhen, nicht über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten können.

Tab. 26: Kennwerte der Wasserretention Freiland Sommerweizen (VP 1) nach Ernte; n=20

Plot/ Tiefe	GePV	wGP	eGP	MP	FP	LK	nFK	FK	TRD
[M.-%]	Vol.-%	pF 0-1,8	pF 1,8-2,5	pF 2,5-4,2	pF >4,2	pF < 1,8	pF 1,8-4,2	pF >1,8	g cm ⁻³
10 -20 cm									
Pellets 0,5	42,27	14,83	8,45	10,51	8,49	14,83	18,96	27,44	1,47
Treber 0,5	43,48	16,95	8,49	10,61	7,43	16,95	19,10	26,53	1,39
Wolle 0,1	42,46	16,10	8,12	6,74	16,94	16,10	17,47	27,43	1,44
Kontrolle	42,41	14,59	7,40	14,43	6,00	14,59	21,83	27,83	1,42
20 - 30 cm									
Pellets 0,5	41,97	14,73	7,77	10,20	9,27	14,73	17,97	27,24	1,47
Treber 0,5	42,48	15,93	8,26	7,92	10,38	15,93	16,17	26,55	1,42
Wolle 0,1	42,49	14,17	9,80	10,06	11,50	14,17	14,86	31,36	1,43
Kontrolle	41,71	14,10	7,60	14,01	6,00	14,10	21,61	27,61	1,49

Auch die Trockenrohdichten bestätigen, dass die Einarbeitung von Schafwollpellets und Rohwolle einen Effekt auf die Bodenstruktur hat. So kommt es im Gegensatz zur Kontrolle bei den Plots mit den genannten Rohstoffen zu keiner wesentlichen Erhöhung der Trocken-

rohdichten mit zunehmender Tiefe. Für die Treber lässt sich dieses wie auch bereits bei der Wasserretention nicht nachweisen (Tab. 26).

Im Gegensatz zur Wasserretention zeigt sich bei der Bodenatmung (vgl. Abb. 45) durch Einbringung der Rohstoffe eine Beeinflussung der tieferen Bodenbereiche. Der Erwartungshaltung entsprechend nimmt bei den Kontrollen die Bodenatmungsrate mit zunehmender Tiefe signifikant ab. Bei den mit Rohstoffen behandelten Plots zeigt sich hingegen ein inverses Bild. Da die Bodenatmung von der Durchwurzelung des Bodens und der mikrobiellen Aktivität abhängt (ROWELL, 2013), kann man davon ausgehen, dass insbesondere durch Rohwolle und Schafwollpellets eine Auflockerung des Bodens erfolgt, wodurch mehr Sauerstoff in tiefere Bodenschichten gelangen kann. Zudem wird durch diese Rohstoffe eine höhere Bodenfeuchte als bei den Kontrollen ermöglicht. Durch alle Rohstoffe werden durch deren Mineralisierung Nährstoffe zur Verfügung gestellt. In Versuchen mit Gärresten wurde nachgewiesen, dass direkt nach der Düngung, aufgrund des hohen Nährstoffeintrags, eine deutliche Erhöhung der Bodenatmung festgestellt werden konnte (TERHOEVEN-URSELMANS et al., 2009). Daher ist davon auszugehen, dass insbesondere die Nährstoffverfügbarkeit einen großen Einfluss auf die Atmungsrate des Bodens ausübt. Die Gesamtheit der genannten Faktoren wirkt sich demzufolge sowohl positiv auf die mikrobielle Aktivität des Bodens aus als auch auf das Pflanzenwachstum mit einhergehender besserer Durchwurzelung des Bodens. Die Beeinflussung der Bodenatmungsraten in den tieferen Bereichen kann durch Verlagerungsprozesse bereits mineralisierter Nährstoffe erklärt werden, sodass insbesondere das Wurzelwachstum verstärkt in diese Bereiche erfolgte. Wurzeln werden nach der Ernte durch Mikroorganismenaktivität mineralisiert (BECK, 1983). Das verstärkte Wurzelwachstum in Bereiche mit eingebrachten Rohstoffen konnte im Rahmen einer Bachelorarbeit am Maisversuch 2015 im Gewächshaus für Rohwolle nachgewiesen werden (DILLING, 2016). Demnach ist direkt über die Bodenatmung und indirekt über die betrachteten pflanzenbaulichen und die weiteren bodenkundlichen Parameter nachgewiesen worden, dass durch die Einarbeitung der Rohstoffe in den Boden eine positive Beeinflussung der Aktivität des Bodenlebens stattfindet.

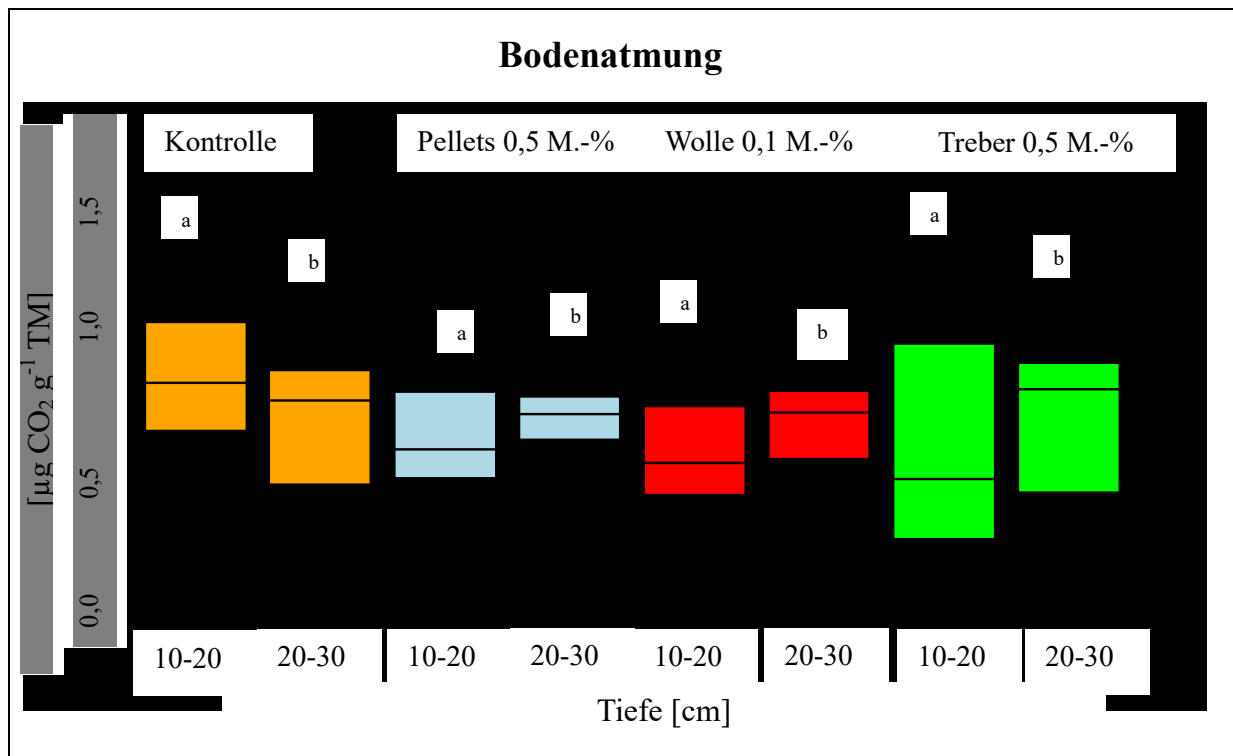


Abb. 45: VP 1 Bodenatmungsraten der jeweiligen Varianten und Tiefen Sommerweizen; n= 20; $\alpha=0,05$

Anhand der Clusteranalysen lässt sich feststellen, wie ähnlich oder unähnlich die Eigenschaften der einzelnen Plots aufgrund ausgewählter Eingangsparameter sind. Eine Auflistung der jeweiligen Eingangsparameter findet sich im Anhang in Tab A 12. Ausgehend von den Ernteparametern lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der Rohwolle mit denen der Schafwollpellets und die der Treber mit denen der Kontrollen die höchste Ähnlichkeit aufweisen. Im Dendrogramm ist eine frühzeitige Trennung dieser beiden Gruppen und demnach eine deutliche Differenzierung der Parameter erkennbar. Eine klare Unterscheidung zwischen den Plots der Rohwolle und denen der Schafwollpellets ist allerdings nicht möglich, da beide in den Gruppierungen des Dendrogramms gleich stark vertreten sind. Hingegen bilden die Plots der Kontrollen und die der Treber mit Ausnahme des Plots 62 eigenständige Gruppierungen aus. So kann für alle Rohstoffe festgehalten werden, dass diese im Vergleich zu den Kontrollen einen deutlichen Einfluss auf die betrachteten Ernteparameter aufweisen (vgl. Abb. 46).

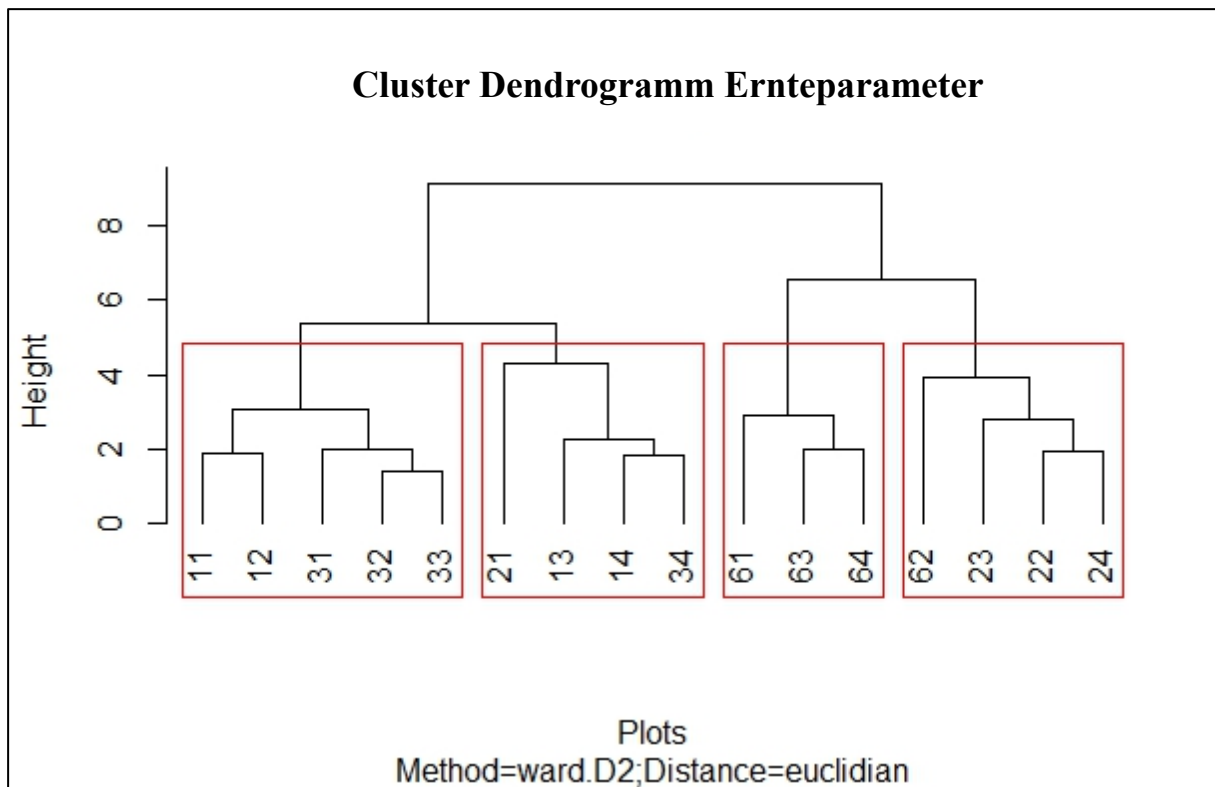


Abb. 46: VP 1 Dendrogramm der Ernteparameter Sommerweizen

Auch anhand der bodenphysikalischen Parameter und der Bodenatmung lassen sich Gruppierungen erkennen. Große Ähnlichkeiten weisen erneut die Parameter der Rohwolle mit denen der Schafwollpellets auf. Allerdings ist für die Treber keine eindeutige Gruppierung erkennbar. Dennoch sind auch hier, ähnlich wie bei den Ernteparametern, deutliche Unterschiede aller mit Rohstoffen behandelten Plots zu den Kontrollen zu erkennen. Demnach können die im Vorfeld durchgeführten Auswertungen der Einzelparameter (Bodenphysik und Bodenatmung) bestätigt werden (vgl. Abb. 47). Abweichungen einzelner Plots in den Clustern sind durch Standortheterogenitäten oder Messungenauigkeiten zu begründen.

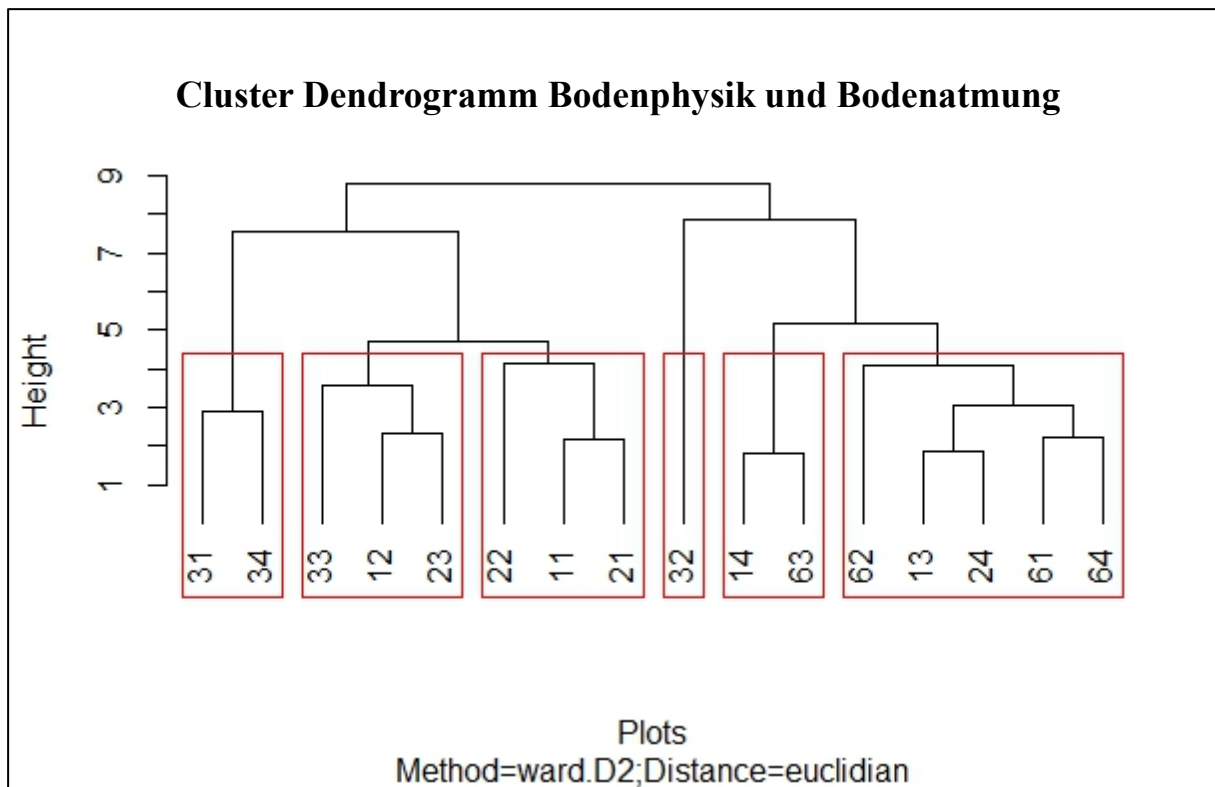


Abb. 47: VP 1 Dendrogramm der bodenphysikalischen Parameter und der Bodenatmung Sommerweizen

Trotz der festgestellten Unterschiede bei der Auswertung der bodenchemischen Einzelparame-
ter (vgl. Tab. 24) lassen sich durch die Clusteranalysen keine eindeutigen Gruppierungen
der Plots erkennen (vgl. Anhang A 17). Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Minerali-
sierungsraten. Im Zusammenhang mit den differenzierten Nährstoffgehalten der einzelnen
Rohstoffe ist eine eindeutige Zuordnung der Plots in Gruppen an dieser Stelle nicht möglich.
Um dieses erreichen zu können, müssten mehrere bodenchemische Analysen über den gesamt-
ten Wachstumsverlauf der Pflanzen erfolgen und charakterisiert werden.

Im Ergebnis der Clusteranalysen kann davon ausgegangen werden, dass nicht nur die Frei-
setzung an Nährstoffen eine entscheidende Rolle auf Wachstum, Entwicklung, Vitalität und
Ertrag der Versuchspflanzen hat, sondern auch die Veränderung der bodenphysikalischen und
-biologischen Eigenschaften.

7.3.2 Winterweizen (2014/2015)

Die Aussaat des Winterweizens (WW) erfolgte am 08.10.2014. Im Vergleich zum langjähri-
gen Mittel von 1981 bis 2010 waren die Monate September 2014 bis Dezember 2014 zu nass,
sodass vom Wachstumsbeginn bis zur Winterruhe von einer ausreichenden Durchfeuchtung

des Bodens auszugehen ist. Zu Beginn der Vegetationsperiode im März 2015 lagen die Niederschlagsmengen etwa auf dem Niveau des langjährigen Mittels. Von April bis einschließlich Juli 2015 war es allerdings deutlich zu trocken, sodass hier von einer schlechten Wasserversorgung der Pflanzen auszugehen ist (vgl. Abb. 2).

Im Vorfeld der Aussaat des Winterweizens wurden in die Parzellen 41, 42, 43 und 44, 0,2 M.-% und in die Parzellen 51, 52, 53 und 54 0,1 M.-% Rohwolle eingebracht. In die übrigen Parzellen sind keine erneuten Rohstoffgaben erfolgt, sodass hier Aussagen zur Langzeitwirkung der im Frühjahr 2014 eingebrachten Rohstoffe erfolgen können. Ab dem 20.03.2015 wurde für das Jahr 2015 mit der Bonitur der Pflanzen begonnen. Das in Abb. 48 dargestellte Längenwachstum zeigt deutlich, dass die Pflanzen der mit 0,1 M.-% Rohwolle behandelten Plots den höchsten Zuwachs aufwiesen und die Pflanzen der mit 0,2 M.-% Rohwolle behandelten in etwa auf dem Niveau der ursprünglich im Frühjahr 2014 gedüngten Plots lagen. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die im Frühjahr 2014 eingebrachten Rohstoffe auch in der folgenden Vegetationsperiode noch positiv im Vergleich zur Kontrolle auf das Längenwachstum der Pflanzen auswirkten. Am geringsten ist dieser Effekt bei den mit Biertrebern behandelten Plots ausgeprägt, was ähnlich wie in den vorhergehenden Versuchen (vgl. 5.4.1 und 7.3.1) auf eine vergleichsweise schnelle Mineralisierung und die damit kürzere Wirkungsdauer hindeutet.

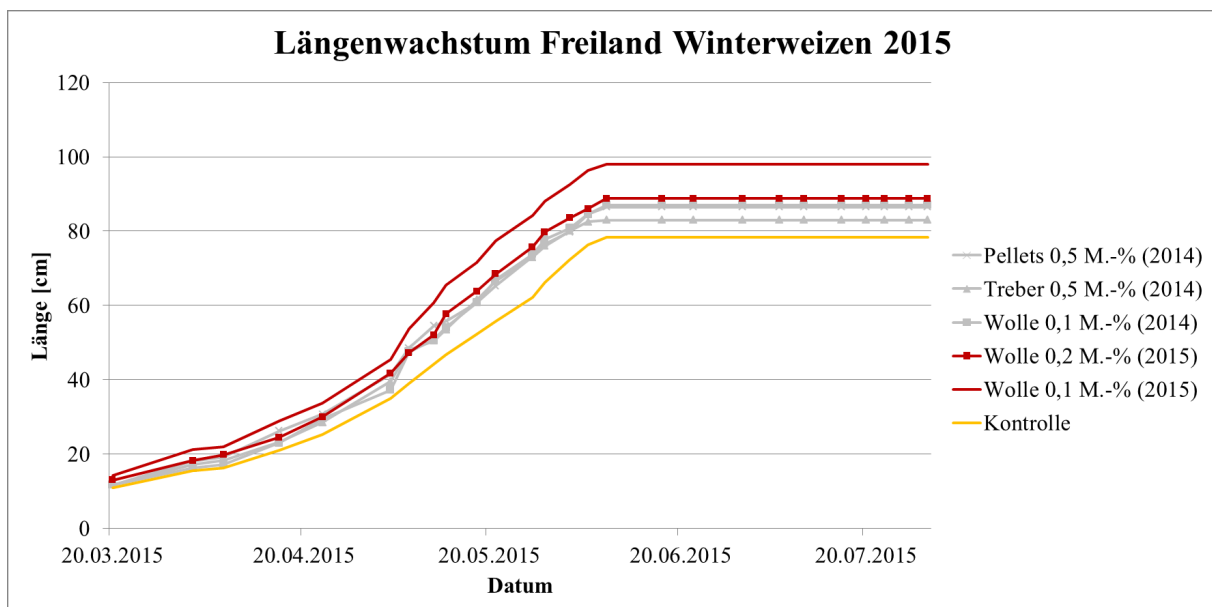


Abb. 48: VP 2 Mittleres Längenwachstum Freiland Winterweizen; n= 40

Ähnlich wie beim Sommerweizen im Gewächshausversuch (vgl. Kap. 6.3.2) und Freilandversuch (vgl. Kap. 7.3.1) konnten auch für die Entwicklung nach BBCH-Codierung des Winter-

weizens keine signifikanten Unterschiede zwischen den Plots festgestellt werden (vgl. Anhang Tab. A 13). Am Verlauf der Chlorophyllgehalte über die Wachstumszeit des Winterweizens (vgl. Abb. 49) ist zu erkennen, dass sowohl die im Frühjahr 2014 als auch die im Herbst 2014 ausgebrachten Rohstoffe im Vergleich zur Kontrolle einen positiven Effekt auf die Pflanzenvitalität hatten. Ähnlich wie beim Längenwachstum wiesen auch hier die Pflanzen auf den Plots, die im Herbst 2014 mit 0,1 M.-% Rohwolle behandelt wurden, die höchsten Werte auf.

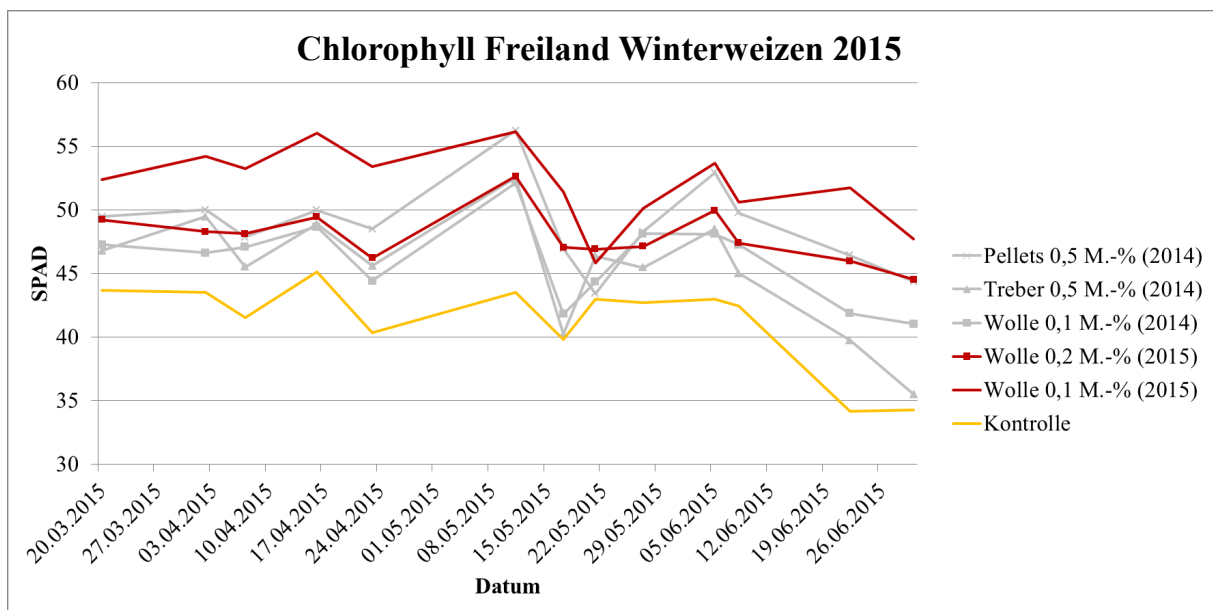


Abb. 49: VP 2 Mittlere Chlorophyllgehalte Freiland Winterweizen; n= 40

Anhand der während des Pflanzenwachstums erhobenen Parameter ist zu erkennen, dass insbesondere Rohwolle und Schafwollpellets einen nachhaltigen Effekt auf Wachstum und Vitalität über mehr als eine Pflanzengeneration erzielen. Damit werden die Untersuchungen von ZHELJAZKOV (2009) grundlegend bestätigt. Hier wurde nachgewiesen, dass Wollfasern auch nach 240 Tagen im Boden immer noch pflanzenverfügbare Nährstoffe bereitstellen. Die aktuellen Untersuchungen dieser Arbeit bestätigen eine Wirksamkeit von mindestens 365 Tagen. Für Biertreber ist dieses in vergleichsweise schwächerer Ausprägung ebenfalls nachweisbar. Zudem scheinen höhere Aufwandmengen (0,2 M.-%) an Rohwolle im Vergleich zu geringeren Mengen (0,1 M.-%) einen negativen Effekt auf die genannten Pflanzenparameter zu besitzen. Bestätigt werden diese Vermutungen auch durch die erhobenen Ernteparameter der Pflanzen (vgl. Abb. 50 und Anhang Tab. A 14). So lagen beispielsweise die Werte der Ernteparameter bei allen Varianten über denen der Kontrolle und waren bei der im Herbst 2014 behandelten Variante mit Rohwolle 0,1 M.-% am höchsten. Bereits SURUCHI (2014) fand heraus, dass ge-

ringe Aufwandmengen an Rohwolle von 40 g je 6 kg Substrat (= 15 t ha⁻¹) die höchsten Erträge für Auberginen erzielt haben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ergeben für Weizen eine Aufwandmenge von maximal 3 t ha⁻¹. Von den mit Rohstoffen behandelten Plots wiesen auch bei diesem Parameter die Pflanzen der mit Biertreber behandelten Plots die geringsten Werte auf.

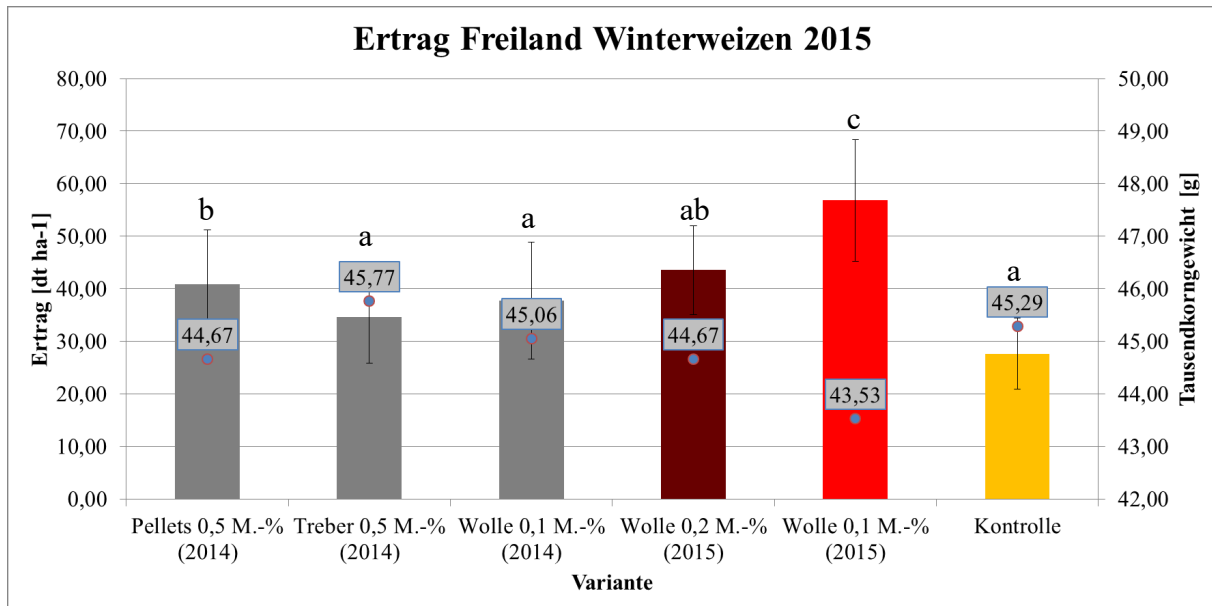


Abb. 50: VP 2 Qualitative und quantitative Ertragsparameter Winterweizen 2015; n= 4; α= 0,05

Sowohl die vergleichsweise hohen Rohproteingehalte im Korn als auch die engen C/N-Verhältnisse des Bodens der mit Schafwollpellets behandelten Plots, weisen für beide Vegetationsperioden (vgl. Tab. 23, Anhang Tab. A 15, Abb. 42 und Anhang A 18) auf ein hohes Maß an pflanzenverfügbarem Stickstoff hin. Dieser wirkte sich nachweislich positiv auf Wachstum und Entwicklung der Pflanzen aus. Dadurch kann es aber zu einer mangelnden Versorgung mit anderen Nährstoffen kommen. Die chemischen Analysen des Korns zeigen, dass Nährstoffe wie Magnesium und Phosphor für die mit Schafwollpellets behandelten Plots nur in kleinen Anteilen vorhanden waren (vgl. Anhang Tab. A 15). Schafwollpellets stellen auch nach vollständiger Mineralisierung nur geringe Mengen der genannten Nährstoffe zur Verfügung (vgl. Tab. 25). Im Zusammenhang mit den hohen Erträgen aus VP 1 (vgl. Kap. 7.3.1) und den vergleichsweise hohen Erträgen der VP 2 ist demnach, trotz hoher Ausgangswerte im Boden von 2013, ohne weitere Düngegaben eine Zehrung dieser Nährstoffe zu erwarten, was auch durch die bodenchemischen Analysen bestätigt werden konnte (vgl. Anhang Tab. A 16). Ähnliches lässt sich auch für die Plots mit Rohwolle (Frühjahr 2014) und deren Magnesiumgehalte im Boden festhalten, wobei hier nach zwei Vegetationsperioden die Nährstoffgehalte

in der Pflanze noch nicht so gering waren wie bei den Schafwollpellets. Dem Minimumgesetz folgend, würde eine regelmäßige hohe Zufuhr an Stickstoff nur solange zu einem verbesserten Pflanzenwachstum führen, bis andere relevante Nährstoffe (z. B. Kalium, Phosphor oder Magnesium) nicht mehr in ausreichender Menge zur Verfügung stehen würden (FINCK, 2007).

Ähnlich wie in VP 1 zeigte sich auch in VP 2 bei den Plots der im Herbst 2014 mit Rohwolle 0,1 M.-% behandelten Varianten ein Anstieg der Bodenatmungsraten mit zunehmender Tiefe. Gleiches gilt auch für die Plots mit Schafwollpellets, was erneut auf langsamere Mineralisierungsraten und eine lange Persistenz im Boden hindeutet. Erwartungsgemäß konnte für die Plots mit Trebern keine erneute Erhöhung der Bodenatmungsraten mit zunehmender Tiefe festgestellt werden. Auch höhere Aufwandmengen an Rohwolle mit 0,2 M.-%, im Herbst 2014 eingebracht, wirkten sich nicht positiv auf die Bodenatmung aus (vgl. Abb. 51).

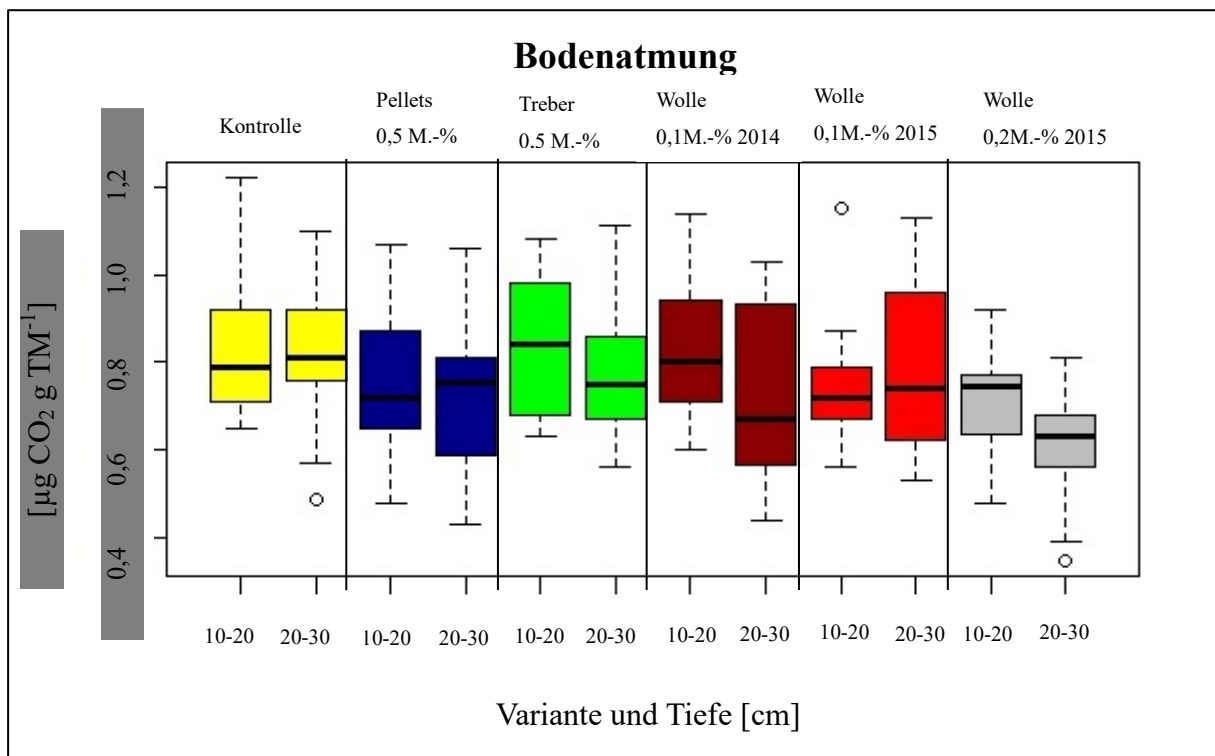


Abb. 51: VP 2 Boxplots der Bodenatmungsraten Freiland Winterweizen 2015; n = 5

Die Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen zeigen, dass zu hohe Aufwandmengen an Rohwolle keine messbaren Effekte an der Pflanze oder den geprüften Bodenkennwerten mehr hervorrufen. Möglicherweise verfilzt die Wolle ab einer bestimmten Aufwandmenge zunehmend und eine homogene Vermengung mit dem umliegenden Bodensubstrat ist dadurch nicht mehr möglich. So können auch die Bodenlebewesen nicht zur Mineralisierung der Wolle beitragen und es kommt kaum zu einer Freisetzung von Nährstoffen oder zu einer messbaren

Erhöhung der mikrobiellen Aktivität. Infolgedessen zeigen auch die Pflanzen kein verbessertes Wachstum. Für die Schafwollpellets und für die Rohwolle lassen sich eindeutig nachhaltige Effekte nach nur einmaliger Zugabe in den Boden nachweisen, wobei diese bei den Pellets noch deutlich stärker ausfallen als bei der Wolle.

Anhand der durchgeführten Clusteranalysen lässt sich insbesondere durch die Ernteparameter und die pflanzenchemischen Analysen des Korns eine eindeutige Gruppierung der im Herbst 2014 mit 0,1 M.-% Rohwolle behandelten Plots nachweisen. Die verbleibenden Plots lassen sich anhand dieser Parameter nicht eindeutig gruppieren (vgl. Anhänge A 19 und A 20). Die Clusteranalyse der bodenchemischen Parameter lässt allerdings die Gruppierung der Plots beider im Herbst 2014 mit Rohwolle behandelten Varianten zu. Zudem ist auch hier eindeutig nachweisbar, dass die Schafwollpellets eine langfristige Wirkung auf die bodenchemischen Kennwerte haben (vgl. Abb. 52).

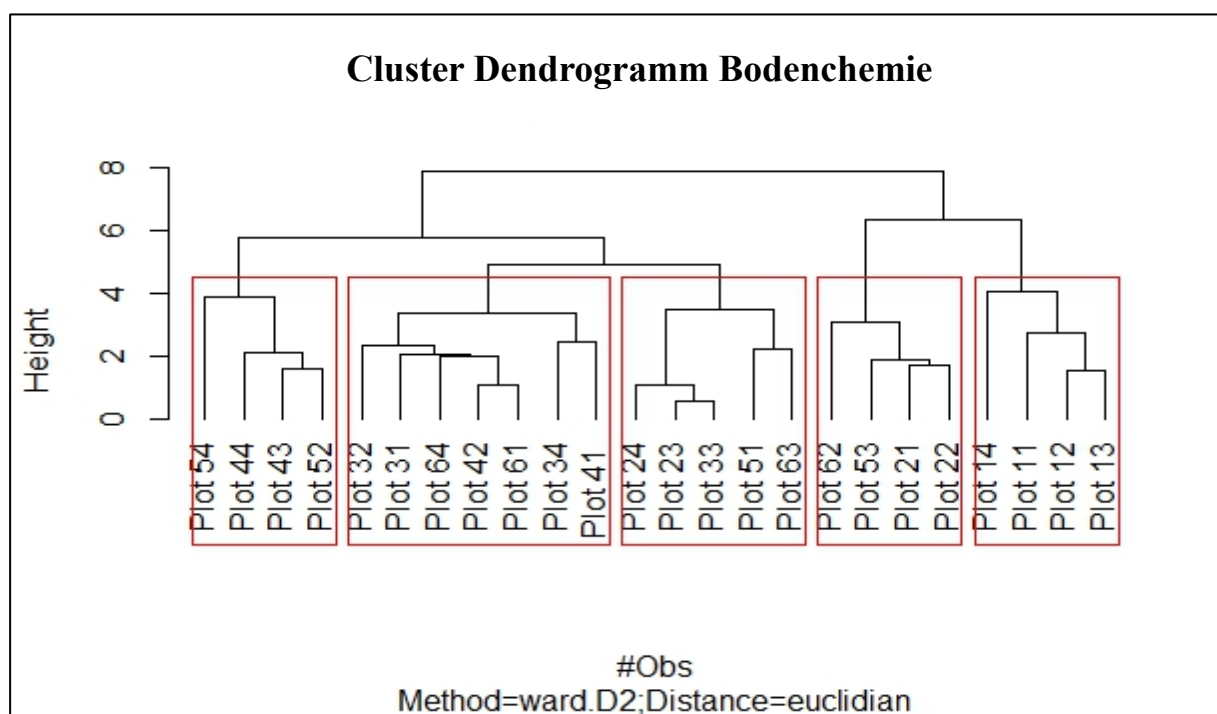


Abb. 52: VP 2 Dendrogramm der bodenchemischen Parameter Winterweizen

7.4 Zwischenfazit Themenkomplex 3 (Freilandversuche)

In den Freilandversuchen konnten die in den Themenkomplexen 1 und 2 nachgewiesenen Effekte auf die Pflanzen und den Boden größtenteils bestätigt werden. So ähneln die Ergebnisse beim Längenwachstum des Sommerweizens stark denen der VR 2 der Gewächshausversuche. Auch hier sind messbar höhere Pflanzen auf den mit Rohstoffen behandelten Plots als auf denen der Kontrollen gewachsen. Analog zu den Gewächshausversuchen konnte beim Sommerweizen kein signifikanter Unterschied bei den Entwicklungsstadien nach BBCH-Codierung zwischen den Varianten mit Rohstoffen und der Kontrolle festgestellt werden. Auch die SPAD-Werte bestätigen die Ergebnisse der Gewächshausversuche. Es sind zwischen den behandelten Varianten kaum Unterschiede feststellbar. Im Vergleich mit der Kontrolle hingegen wiesen die Pflanzen aller mit Rohstoffen behandelten Plots eine höhere Vitalität auf. Weiterhin konnten auch die höheren Erträge des Sommerweizens der behandelten Varianten im Vergleich zur Kontrolle in den Freilandversuchen bestätigt werden. Anhand der ermittelten Parameter am Korn war es hier möglich, detailliertere Aussagen zur Nährstoffversorgung in den einzelnen Wachstumsstadien der Pflanzen zu treffen als in den Gewächshausversuchen. So wiesen die Pflanzen der Plots mit Schafwollpellets und Biertrebern die höchsten Kornzahlen pro Ähre auf, was auf eine gute Nährstoffversorgung, insbesondere durch Stickstoff, während des Schossens hindeutet. Für die Pflanzen der Plots mit Rohwolle sind hingegen nur Kornzahlen auf dem Niveau der Pflanzen der Kontrollen ermittelt worden, was auf eine schlechte Nährstoffversorgung während des Schossens hindeutet. Das Tausendkorngewicht war ebenfalls bei den Pflanzen der mit Schafwollpellets behandelten Plots am höchsten, gefolgt von denen der Rohwolle, der Biertreber und der Kontrolle. Relevant für das Tausendkorngewicht sind die Nährstoffgehalte während des Ährenschiebens. Auch die Kornanalysen zeigen die höchsten Rohproteingehalte bei den Pflanzen der Plots mit Schafwollpellets, gefolgt von denen mit Rohwolle, Biertreber und der Kontrolle. Demnach wurden zum Zeitpunkt des Ährenschiebens verstärkt durch Rohwolle Nährstoffe zur Verfügung gestellt, wohingegen die Nährstoffverfügbarkeit der Plots mit Biertreber deutlich zurückgegangen sein muss. Hierdurch wird die Vermutung aus den vorhergehenden Themenkomplexen bestätigt, dass Rohwolle langsam mineralisiert und Nährstoffe erst nach einer bestimmten Zeitspanne zur Verfügung stellen kann, wohingegen die Biertreber sehr schnell mineralisiert werden und die Nährstoffe insbesondere zu Beginn des Pflanzenwachstums zur Verfügung stellen. Bestätigt wird diese Theorie zudem durch die Bodenanalysen der einzelnen Plots. So waren die C/N-Verhältnisse des Bodens der Plots mit Schafwollpellets und Rohwolle am engsten, was auf

hohe Mineralisierungsraten und eine gute Pflanzenverfügbarkeit von Stickstoff schließen lässt. Weiterhin zeigen auch die Ergebnisse der Kaliumanalysen, dass Schafwollpellets und Rohwolle eher langsam zersetzt werden und Nährstoffe freigeben, wohingegen die schnelle Mineralisierung der Bietreber erneut bestätigt wird. Obwohl in Bietrebern wesentlich geringere Ausgangsgehalte an Kalium enthalten sind als in Schafwollpellets und Rohwolle, konnten in den Bodenanalysen nach der Ernte ähnliche Gehalte festgestellt werden. Demnach lässt sich schlussfolgern, dass das Risiko der Auswaschung von Nährstoffen bei Einarbeitung von Schafwollpellets und Rohwolle aufgrund der langsameren Nährstofffreisetzung deutlich geringer ist als bei Bietrebern. Schafwollpellets besitzen gegenüber der Rohwolle allerdings den Vorteil, dass sie bereits kurz nach Einarbeitung in den Boden eine düngende Wirkung aufweisen, sodass die Pflanzen hierdurch gegenüber denen der Rohwolle einen Wachstumsvorsprung bekommen. Erst mit beginnender Mineralisierung der Rohwolle wird dieser Vorsprung teilweise kompensiert. Aufgrund der langsamen Mineralisierungsraten konnte für Schafwollpellets und Rohwolle ein nachhaltiger Effekt auf das Pflanzenwachstum über mindestens zwei Vegetationsperioden nachgewiesen werden. Die Schafwollpellets scheinen hierbei eine noch stärkere Wirkung zu besitzen als reine Rohwolle. So konnten in Versuchen mit Winterweizen in der zweiten Vegetationsperiode nach einmaliger Einarbeitung der Rohstoffe im Vorfeld der ersten Vegetationsperiode höhere Wachstumsraten und Erträge an den Pflanzen nachgewiesen werden. Geringfügig gilt das auch für Bietreber, durch deren Einbringung auch in Vegetationsperiode zwei höhere Wachstumsraten und Erträge als bei der Kontrolle erzielt werden konnten. Auch hier spielt insbesondere die Stickstoffbereitstellung durch die Rohstoffe eine entscheidende Rolle. Die engsten C/N-Verhältnisse in Vegetationsperiode zwei wurden erneut im Boden der Plots mit Schafwollpellets gemessen, gefolgt von denen der Rohwolle, Bietreber und Kontrolle. Durch die hohe Zufuhr an Stickstoff und das daraus resultierende gute Wachstum der Pflanzen bei Einarbeitung von Schafwollpellets kann es aber nach dem Minimumgesetz zur Zehrung weiterer Nährstoffe wie Magnesium und Phosphor kommen, was sich in Vegetationsperiode eins aufgrund der durchgeführten Bodenanalysen bereits angedeutet hat. Anhand der Freilandversuche konnten allerdings nicht nur die Ergebnisse der Parameter Wachstum, Ertrag und Bodenchemie der Gewächshausversuche bestätigt bzw. detaillierter ausgeführt werden, sondern auch bodenphysikalische Effekte, welche bereits in Themenkomplex 1 diskutiert wurden. So fand auch in den Freilandversuchen der Vegetationsperiode eins durch Einarbeitung von Rohwolle eine messbare Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens statt. Weiterhin konnte dieser Effekt erstmalig auch für Schafwollpellets nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Themenkom-

plex 1 war allerdings der Effekt für die Biertreber nicht mehr nachweisbar, da die Messungen erst nach der Ernte und damit einer relativ langen Verweildauer der Treber im Boden durchgeführt wurden. Demnach kann festgehalten werden, dass Schafwollpellets und Rohwolle einen messbaren Effekt auf die Wasserspeicherfähigkeit über längere Zeiträume ausüben und Biertreber aufgrund ihrer schnellen Mineralisierung nur kurzfristig wirken können. Die Bodenatmung ist in Vegetationsperiode eins durch alle eingearbeiteten Rohstoffe im Vergleich zur Kontrolle mit zunehmender Tiefe angestiegen. Demnach kommt es durch die höheren Bodenfeuchten und die eingebrachten Nährstoffe zu einer Erhöhung der mikrobiellen Aktivität. Weiterhin nimmt auch die unterirdische Biomasse (Durchwurzelung) zu, die nach erfolgter Ernte durch die Bodenfauna abgebaut wird, was letztlich zu einem höheren Ausstoß von CO₂ führt und demzufolge in einer höheren messbaren Bodenatmung resultiert. Es wurde weiterhin untersucht, ob höhere Aufwandmengen an Rohwolle zu stärkeren positiven Effekten an Pflanze und Boden führen. Durch eine Erhöhung der Aufwandmengen auf 0,2 M.-% ist an allen untersuchten Parametern keine Steigerung der Effekte erkennbar. Im Gegenteil wirkt sich eine Erhöhung eher negativ aus, sodass die ermittelten Werte der betrachteten pflanzenbaulichen, bodenchemischen und bodenphysikalischen Parameter sowie die Bodenatmung häufig auf dem Niveau der Kontrollen lagen oder nur geringfügige Unterschiede aufwiesen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in Themenkomplex 1 und 2 nachgewiesenen Effekte auf pflanzenbauliche und bodenchemische Parameter bestätigt und ergänzt werden konnten. Für die bodenphysikalischen Parameter ist für Biertreber ergänzend zu den Ergebnissen in Themenkomplex 1 festgestellt worden, dass diese nur einen kurzfristigen Effekt aufweisen. Zudem konnte im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Themenkomplex 1 auch für Schafwollpellets eine positive und langfristige Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bestätigt werden. Für Rohwolle gilt zudem, dass sich eine Erhöhung auf 0,2 M.-% in dem genutzten sandigen Substrat teilweise negativ auf pflanzenbauliche, bodenchemische und bodenphysikalische Parameter im Vergleich zu einer geringeren Aufwandmenge von 0,1 M.-% auswirkt. Diese Ergebnisse bestätigen auch die in Themenkomplex 1 durchgeführten Wachstumsversuche mit Koriander, bei denen zu hohe Aufwandmengen eine vergleichsweise hemmende Wirkung auf das Pflanzenwachstum hatten.

8. Fazit und Ausblick

In einem ersten Schritt sind im Rahmen dieser Arbeit Rohstoffe oder hieraus aufbereitete Produkte identifiziert worden. Ziel war es, durch die Zugabe dieser Stoffe messbare Beeinflussungen bodenchemischer und –physikalischer Parameter zu erreichen, sodass anhand unterschiedlicher Versuchspflanzen wie Koriander, Mais, Sommerweizen und Winterweizen positive Effekte auf Wachstum, Entwicklung, Vitalität und Ertrag festgestellt werden können. Zudem sollte eine differenzierte Betrachtung der Wirkung auf C₄-Pflanzen wie Mais und C₃-Pflanzen wie Weizen erfolgen. Zunächst wurde eine Vielzahl potentieller Rohstoffe auf wachstumsfördernde oder wachstumshemmende Beeinflussungen an Koriander überprüft. Dazu sind in ein sandiges Ausgangssubstrat Mengen zwischen 0,1 M.-% und 2,0 M.-% an Rohwolle, Schafwollpellets, Biertreber, Algen der Arten *Lessonia nigrescens* und *Lessonia trabeculata*, Alginat, Wasserpflanzen aus der Müggelspree sowie Hornkraut eingemischt worden. Es konnte festgestellt werden, dass die beiden Algenarten mit Zunahme der Einbringungsmenge in das Ausgangssubstrat eine deutliche wachstumshemmende Wirkung auf die Versuchspflanze ausübten. Ursache dafür waren die hohen Salzgehalte der Algen. Durch die Zugabe von Alginat kam es schon bei geringsten Mengen zu einer Verkrustung der Bodenoberfläche, sodass hier bereits ein Aufkeimen der Pflanzen weitestgehend verhindert wurde. Auch mit Zugabe der Wasserpflanzen und des Hornkrauts zeigten sich keine wachstumssteigernden Effekte für die Versuchspflanzen. Dagegen wurden durch die Zugabe von 0,1 M.-% Rohwolle sowie 0,5 M.-% Schafwollpellets bzw. Biertreber die stärksten wachstumsfördernden Effekte am Koriander registriert. Im Ergebnis dieser Versuche wurden in allen weiteren Untersuchungen nur noch die Rohstoffe Rohwolle, Schafwollpellets und Biertreber betrachtet. Zunächst erfolgte eine umfassende Charakterisierung der Rohstoffe. Anschließend wurden Gewächshausversuche mit Mais und Sommerweizen auf dem gleichen sandigen Substrat durchgeführt, welches bereits in den Vorversuchen und nachfolgend auch in den Freilandversuchen genutzt wurde. Für die Freilandversuche wurden zwei Vegetationsperioden betrachtet, in denen Sommerweizen gefolgt von Winterweizen gesät wurde.

Anhand der chemischen Analysen ist erkennbar, dass bei vollständiger Mineralisierung der Biertreber insbesondere Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor zur Verfügung gestellt werden. Kalium ist hingegen auch bei einer angenommenen vollständigen Mineralisierung für Kulturpflanzen wie Weizen und Mais nur in unzureichenden Mengen vorhanden. Aufgrund

der hohen Stickstoffgehalte sind Biertreber laut geltender Gesetzeslage bei Anwendung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen als Düngemittel einzustufen. Für alle Versuchsreihen im Gewächshaus und die erste Vegetationsperiode im Freiland zeigte sich die hohe Verfügbarkeit von Stickstoff insbesondere durch die Beobachtung der pflanzenbaulichen Parameter Wachstum, Entwicklung und Vitalität. Im Anschluss an die erste Vegetationsperiode der Freilandversuche mit Sommerweizen ist zudem ein im Vergleich zum reinen Substrat enges C/N-Verhältnis des Bodens registriert worden, was ebenfalls für ein hohes Maß an pflanzenverfügbarem Stickstoff spricht. Hinzu kommt eine nachgewiesene Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit durch Einbringung der Biertreber in ein sandiges Ausgangssubstrat. Durch die höhere Wasserspeicherfähigkeit des Bodens war im Gewächshausversuch auch anhand der Turgorwerte eine bessere Versorgung der Versuchspflanze Mais mit Wasser nachweisbar. Für die Freilandversuche konnten keine Nachweise zu einer erhöhten Wasserspeicherfähigkeit des Bodens durch Zugabe der Biertreber erbracht werden. Sowohl die Verfügbarkeit an Nährstoffen als auch die Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens sind für Biertreber nur über eine relativ kurze Zeitspanne nachweisbar. So ist bereits durch die Streubeutelversuche und die anschließend durchgeführten REM-Aufnahmen vermutet worden, dass sich die Biertreber mit Ausnahme der ligninhaltigen Bestandteile sehr schnell im Boden zersetzen. Durch die zügige Mineralisierung stehen auch den Pflanzen nur zu Beginn der Wachstumsperiode ausreichend Nährstoffe insbesondere in Form von Stickstoff zur Verfügung. So weisen die hohen Kornzahlen je Ähre im Zusammenhang mit einem geringen Tausendkorngewicht auf eine gute Nährstoffversorgung zum Zeitpunkt des Schossens, aber auf eine unzureichende Nährstoffversorgung zum Zeitpunkt des Ährenschiebens und der Kornfüllungsphase hin. Auch ist anhand der pflanzenbaulichen Parameter Wachstum, Entwicklung und Vitalität in der zweiten Vegetationsperiode der Freilandversuche nur noch ein geringfügiger Effekt durch die Biertreber nachweisbar. Bestätigt wird die Vermutung der schnellen Mineralisierung auch durch die Messung des Wasserrückhaltevermögens des Bodens. Wie bereits erwähnt, war schon nach einer Vegetationsperiode der Freilandversuche nach der Ernte des Sommerweizens keine Beeinflussung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens mehr messbar. Dennoch kommt es trotz der zügigen Mineralisierung zu einer Beeinflussung des Bodenlebens. So sind nach der ersten Vegetationsperiode mit zunehmender Tiefe erhöhte Bodenatmungsraten registriert worden. Aufgrund der hohen Nährstoffzufuhr und der Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit kommt es vermutlich zu einer vermehrten Ausbildung unterirdischer Biomasse in Form von Wurzeln. Durch deren Abbau nach der Ernte und die höheren Bodenfeuchtigkeiten infolge der höheren Wasserspeicherfähigkeit kommt es aufgrund der höheren Aktivität der

Bodenlebewesen zu einem Anstieg der Bodenatmungsraten mit zunehmender Tiefe. Im Ergebnis der Untersuchung ist Biertreber ein guter Lieferant von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor. Dennoch kann nach der Einbringung auf eine zusätzliche Düngung vermutlich nicht verzichtet werden. Da für das Pflanzenwachstum relevante Nährstoffe wie Kalium nicht in ausreichenden Mengen vorhanden sind, sollten in Abhängigkeit von der Pflanzkultur und den Standortgegebenheiten weitere Nährstoffe zugegeben werden. Aufgrund der schnellen Mineralisierung steigt zudem das Risiko der Auswaschung relevanter Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor. Weiterhin besteht das Risiko, dass durch die günstigen Nährstoff- und verbesserten Wasserhaushaltsbedingungen zu Beginn des Pflanzenwachstums eine relativ hohe Biomasse ausgebildet wird. Bei anschließender vollständiger Mineralisierung der Biertreber gehen diese Effekte aufgrund von potentiellm Nährstoffmangel allerdings verloren. Als Folge zunehmender Trockenheit im Verlauf einer Vegetationsperiode besteht dadurch die Möglichkeit, dass die Pflanzen diese nicht mehr kompensieren können. Dadurch kann es zu Wasserstress und infolgedessen zu Ertragseinbußen kommen. Dennoch können Biertreber, aufgrund ihrer Nährstoffe und ihres Potentials die Wasserspeicherfähigkeit sandiger Standorte zumindest kurzfristig zu erhöhen, eine gute Ergänzung zu anderen Düngemitteln auf sandigen Standorten darstellen. Ihre Handhabung ist vergleichsweise einfach, da vor Einarbeitung in den Boden keine weiteren Aufbereitungsschritte unternommen werden müssen.

Ähnlich wie bei den Biertrebern weisen auch bei der Rohwolle die Nährstoffanalysen darauf hin, dass durch die Mineralisierung im Boden Nährstoffe zur Verfügung gestellt werden. Auch Rohwolle ist aufgrund der Nährstoffgehalte bei Anwendung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen als Düngemittel zu bezeichnen. Im Vergleich zu den Trebern beinhaltet Rohwolle verhältnismäßig viel Kalium und ähnliche Gehalte an Stickstoff. Es fehlen allerdings Magnesium und Phosphor in ausreichenden Mengen, um ein optimales Wachstum an Kulturen wie Weizen oder Mais zu erreichen. Anhand der Ergebnisse im Wachstum, der Entwicklung und der Vitalität der Versuchspflanzen Mais und Weizen lässt sich eine hohe Bereitstellung an pflanzenverfügbarem Stickstoff nachweisen. Dieses wird durch die engen C/N-Verhältnisse des Bodens bestätigt, welche im Verlauf der Freilandversuche im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle festgestellt worden sind. Auch lassen sich anhand von Bodenanalysen nach erfolgreicher Ernte die mangelnden Gehalte an Magnesium und Phosphor bestätigen. Im Vergleich zu den Biertrebern erfolgt die Mineralisierung der Rohwolle verhältnismäßig langsam. Bereits in den Vorversuchen wurde anhand der Streubeutelversuche und der REM-Aufnahmen ersichtlich, dass die Rohwolle auch nach mehreren Monaten im Boden noch in ihrer Struktur erkennbar ist. Aufgrund der geringen Kornzahl je Ähre und des hohen Tausendkorngewichts

wird deutlich, dass zu Beginn der Vegetationsperiode 1, im Stadium des Schossens, nur geringfügige Nährstoffmengen in Form von insbesondere Stickstoff zur Verfügung standen und zum Zeitpunkt des Ährenschiebens bzw. der Kornfüllungsphase ausreichende Mengen. Auch die Ergebnisse zur Wasserspeicherfähigkeit in den Vorversuchen und in den Freilandversuchen bestätigen die verzögerte Mineralisierung. Rohwolle weist aufgrund der hohen Lanolin-gehalte auf den einzelnen Wollfasern zunächst einen stark hydrophoben Charakter auf. Daher kann kaum eine messbare Aufnahme an Wasser stattfinden. Nach einer Verweildauer von ca. einem Monat im Boden wird das Lanolin zunehmend abgebaut. Aus diesem Grund sind die einzelnen Wollfasern in der Lage, Wasser aufzunehmen und so zu einer messbaren Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit eines sandigen Substrates beizutragen. Dieser Effekt ist auch, wie in Vegetationsperiode 1 der Freilandversuche nachgewiesen werden konnte, nach einer Verweildauer von mindestens vier Monaten im Boden nachweisbar. Infolge der langsamen Mineralisierung werden auch die Nährstoffe nur zeitverzögert freigesetzt. Anhand der durchgeführten Freilandversuche ist zudem ersichtlich, dass die Rohwolle auch bei einer folgenden Pflanzkultur (hier Winterweizen) positiv auf Wachstum, Entwicklung und Vitalität im Vergleich zu einer Kontrolle wirkt. Eine erneute Einarbeitung der Rohwolle nach der Ernte des Sommerweizens führte zu noch besseren Ergebnissen der genannten Parameter. Auch kann dadurch die Zunahme der Bodenatmungsraten mit zunehmender Tiefe erneut festgestellt werden. Ein langfristiger Effekt der in der VP 1 eingearbeiteten Rohwolle ist hingegen nicht nachweisbar. Ursächlich für die registrierten Erhöhungen sind ebenso wie bei den Biertreibern die Zunahme der unterirdischen Biomasse in Form von Wurzeln als Folge der guten Nährstoffverfügbarkeit und die höhere Bodenfeuchte. Dadurch kommt es zu einer über die Bodenatmungsraten messbaren Erhöhung der Aktivität des Bodenlebens. Weiterhin wurde untersucht, ob höhere Aufwandmengen zu einer Steigerung der Werte führen können. Im Vergleich zu einer Aufwandmenge von 0,1 M.-% zeigen die Ergebnisse mit einer Aufwandmenge von 0,2 M.-% deutlich geringere Werte in den erhobenen pflanzenbaulichen und auch bodenkundlichen Parametern. So wirken höhere Aufwandmengen im Rahmen dieser Untersuchungen negativ auf Wachstum, Entwicklung, Vitalität und Ertrag der betrachteten Pflanzkultur Winterweizen. Auch die unter 0,1 M.-% höheren Nährstoffgehalte im Boden sowie die Erhöhung der Bodenatmungsraten mit zunehmender Tiefe lassen sich bei 0,2 M.-% nicht mehr nachweisen. Demnach ist davon auszugehen, dass durch die Einbringung größerer Mengen an Rohwolle die Mineralisierungsprozesse herabgesetzt werden, da das umliegende Bodenmaterial die einzelnen Wollfasern vermutlich nicht ausreichend umlagern kann. Hierdurch können die Bodenlebewesen die Fasern nur verhältnismäßig langsam zersetzen. Aus diesem Grund sollte

die Rohwolle auch nur nach erfolgter Zerkleinerung auf wenige Zentimeter in den Boden eingebracht werden und nicht als komplettes Wollfließ. Dennoch ist die Verwendung von Rohwolle als Düngemittel in Ergänzung zu anderen Düngemitteln sinnvoll. Zum einen werden hohe potentielle Mengen an Stickstoff über einen längeren Zeitraum zur Verfügung gestellt und zum anderen kommt es zu einer messbaren Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit sandiger Substrate auch über längere Zeiträume. Eine Ergänzung durch weitere Düngemittel ist insbesondere aufgrund der mangelnden Gehalte an Magnesium und Phosphor vermutlich notwendig. Weiterhin erfordert die nur langsam beginnende Mineralisierung zu Beginn der Vegetationsperiode eventuell auch eine zusätzliche Zufuhr an Nährstoffen, um ein optimales Pflanzenwachstum zu erreichen.

Bei Schafwollpellets handelt es sich laut Hersteller um gepresste Rohwolle, die wegen der hohen Nährstoffgehalte bereits vom Hersteller als Düngemittel bezeichnet werden. Die Nährstoffanalysen belegen, dass im Gegensatz zur Rohwolle hohe Gehalte an Calcium vorhanden sind, was auch zu einer vergleichsweise deutlichen Erhöhung des pH-Wertes der Schafwollpellets führt. Weiterhin über den Gehalten der Rohwolle liegen Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium. Aufgrund der hohen Nährstoffgehalte ließen sich in allen Versuchen durch Zugabe von Schafwollpellets im Vergleich zu Rohwolle und Biertreber bessere Ergebnisse in Wachstum, Entwicklung und Vitalität der Versuchspflanzen Mais und Weizen erzielen. Auch die bodenchemischen Parameter weisen auf einen deutlichen Eintrag an Nährstoffen hin. Im Gegensatz zur Rohwolle werden durch die Schafwollpellets über die gesamte Wachstumsperiode ausreichend Nährstoffe zur Verfügung gestellt. Zunächst stehen vermutlich schnell pflanzenverfügbare Nährstoffe zur Verfügung und im Verlauf einer Vegetationsperiode werden ähnlich wie bei der Rohwolle durch eine langsame Mineralisierung weiterhin Nährstoffe frei. Bei den Schafwollpellets konnte zudem keine, die Fasern umlagernde, Lanolinschicht in den REM-Aufnahmen festgestellt werden. Ähnlich wie bei der Rohwolle kann bei den Schafwollpellets von einem langfristigen Effekt auf das Pflanzenwachstum über mindestens zwei Vegetationsperioden gesprochen werden. Allerdings ist der Effekt im Gegensatz zur Rohwolle und den Biertrebern auch an bodenkundlichen Parametern über längere Zeiträume nachweisbar. So ist die Bodenatmungsrate mit zunehmender Tiefe auch in der zweiten Vegetationsperiode noch erhöht. Zudem lässt sich ähnlich wie bei der Rohwolle auch bei den Schafwollpellets eine Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens in den Freilandversuchen über einen längeren Zeitraum nachweisen. Im Vergleich zur Rohwolle mit 0,1 M.-%, konnte in den Vorversuchen für Schafwollpellets aber erst ab einer Aufwandmenge von 0,5 M.-% eine wachstumsfördernde Wirkung am Koriander festgestellt werden. Weiterhin

deutete sich in der zweiten Vegetationsperiode der Freilandversuche an, dass es durch die hohe Zufuhr an Stickstoff und das daraus resultierende Pflanzenwachstum in den folgenden Wachstumsperioden zu einem Mangel anderer Nährstoffe wie Phosphor oder Magnesium kommen kann. Durch die hohe Zufuhr an Stickstoff ist trotz der langsamen Mineralisierung im Vergleich zur Rohwolle das Risiko der Auswaschungen erhöht. Allerdings sind die Schafwollpellets im Vergleich zur Rohwolle aufgrund ihrer äußeren Form leichter zu handhaben. Dennoch ist der Einsatz der Schafwollpellets im Vergleich zur Rohwolle verhältnismäßig teuer und daher bisher nur für den Kleingebrauch sinnvoll. Auch ist die Herstellung mit der Aufwendung von Energie verbunden und es wird nicht deutlich, ob bei der Herstellung außer Rohwolle noch weitere Stoffe zugegeben werden. Daher kann festgehalten werden, dass anhand der in diesen Untersuchungen erzielten Ergebnisse eine Aufbereitung der Rohwolle zu Schafwollpellets für den großflächigen Einsatz nicht sinnvoll erscheint.

Zusammenfassend können sowohl Biertreber und Rohwolle vom Schaf als auch Schafwollpellets aufgrund der Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht nur als Düngemittel sondern auch als Bodenverbesserungsmittel bezeichnet werden. Alle Rohstoffe führen durch ihre Einbringung in ein sandiges Ausgangssubstrat zu einer nachweisbaren positiven Beeinflussung bodenphysikalischer, -chemischer und -biologischer Parameter.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Biertreber auch zu Biokohle verarbeitet werden. Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit war es nicht Teil der Fragestellung, eine vergleichende Untersuchung zwischen aus Biertrebern hergestellter Biokohle und Biertrebern durchzuführen. Dennoch scheint eine Aufbereitung zu Biokohle nicht zwingend notwendig, da auch durch die Zugabe von frischen Trebern positive Effekte auf bodenkundliche und pflanzenbauliche Parameter in einem sandigen Substrat erzielt werden konnten. Daher sollte im Vorfeld der Biokohleherstellung aus Treber abgewogen werden, welche Eigenschaften der jeweiligen Materialien zielführend für spezifische bodenkundliche und pflanzenbauliche Ansprüche sind. Für Rohwolle vom Schaf konnte hingegen nachgewiesen werden, dass die Aufbereitung zu Schafwollpellets zu besseren Ergebnissen der pflanzenbaulichen Parameter führt. Aufgrund der geringen Aufwandsmengen, des günstigen Preises und ebenfalls positiver Wirkungen der Rohwolle auf bodenkundliche und pflanzenbauliche Parameter ist eine Aufbereitung zu Schafwollpellets für die Anwendung in landwirtschaftlichen Maßstäben aber momentan noch nicht sinnvoll.

Die Reaktion von C₄-Pflanzen wie Mais und C₃-Pflanzen wie Weizen auf die Rohstoffe war prinzipiell ähnlich. Aufgrund der Eigenschaften der Rohstoffe, die Wasserspeicherfähigkeit in sandigem Substrat zu erhöhen, durch ihre Mineralisierung pflanzenverfügbare Nährstoffe zu liefern und zu einer Aktivitätssteigerung des Bodenlebens beizutragen, ist der Einsatz der Rohstoffe sowohl bei C₃-Pflanzen wie Weizen als auch bei C₄-Pflanzen wie Mais als sinnvoll anzusehen. Es sollte allerdings auf eine angepasste Zusatzdüngung geachtet werden. Trotz der höheren Wassernutzungseffizienz von Mais hat dieser unter Wassermangelbedingungen stärker als Weizen auf die Beeinflussungen durch die Zugabe der Rohstoffe reagiert. Mais bildet insbesondere unter einer guten Zufuhr an Stickstoff hohe Biomassen aus. Problematisch werden die hohen Biomassen bei zunehmender Trockenheit und dem Mangel weiterer, für die Pflanze essentieller, Nährstoffe. So ist beim Mais das Risiko hoch, durch eine hohe Zufuhr an Stickstoff und geringe Mengen an Kalium unter Wassermangelbedingungen ertragsmindernde Effekte durch Trockenstresssymptome der Pflanze zu erzielen.

In dieser Forschungsarbeit war es vor allem möglich, potentielle Rohstoffe zu identifizieren, die Aussagen über die Beeinflussung bodenphysikalischer und –chemischer Prozesse und ihrer Wirkung auf pflanzenbauliche Parameter ermöglichen. Weiterhin konnten diese Rohstoffe in ihren grundlegenden Eigenschaften charakterisiert und aufgrund ihrer Eigenschaften als Bodenverbesserungsmittel identifiziert werden. Dennoch müssen weitere Untersuchungen erfolgen. So sollte geprüft werden, unter welchen Umgebungsbedingungen die Mineralisationen der Rohstoffe am effektivsten und angepasst an die Bedürfnisse spezifischer Pflanzkulturen ablaufen. In diesem Zusammenhang ist auch die detaillierte Identifizierung der beeinflussenden Makro- und Mikrofauna des Bodens von Interesse. Zudem handelt es sich bei Biertreber und Rohwolle um Naturprodukte, die in ihrer strukturellen und chemischen Zusammensetzung Unterschiede aufweisen können. Hier sollte durch empirische Studien geprüft werden, ob eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der durchgeführten Analysen auch auf andere Chargen der Rohstoffe gegeben ist. Da in dieser Studie die Beeinflussung des Wasserhaushaltes der Pflanze durch die von den Rohstoffen gelieferten Nährstoffe teilweise überlagert wurde, sind weitere Untersuchungen diesbezüglich unter optimaler Nährstoffversorgung durch angepasste Ergänzungsdüngungen der Pflanzkulturen notwendig. Im Hinblick auf die aktuelle Problematik der Bodenverbesserung mit Biokohle sind vergleichende Untersuchungen, insbesondere zu Biertrebern, ebenfalls sinnvoll.

9. Literatur

- ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M. und WESSOLEK, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, *Geoderma* (Band 202), Seite 183-191.
- ALBURQUERQUE, J. A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; DEL CAMPILLO, M. del C.; GALLARDO, A. und VILLAR, R. (2013): Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels, *Agronomy for Sustainable Development* (Band 33), Nr. 3, Seite 475-484.
- AMLER, R. (2003): Silomaisreife und Sortenwahl nach Maß, *Gesunde Pflanzen* (Band 55), Nr. 6, Seite 175-183.
- ASBB (2015): Maisanbaufläche 2015 erneut auf Rekordniveau im Land Brandenburg
Pressemitteilung Amt für Statistik Brandenburg, Nr. 194, 29.07.2015, Pressemitteilung, aufgerufen am 28.11.2016, <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/pms/2015/15-07-29.pdf>.
- ASLAM, M.; ZAMIR, M. S. I.; AFZAL, I. und AMIN, M. (2014): Role of potassium in physiological functions of spring maize (*Zea mays* L.) grown under drought stress, *The Journal of Animal & Plant Sciences* (Band 24), Seite 1452-1465.
- BECK, T. (1983): Die N-Mineralisierung von Böden im Laborbrutversuch, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (Band 146), Nr. 2, Seite 243-252.
- BECKWITH, C.; COOPER, J.; SMITH, K. und SHEPHERD, M. (1998): Nitrate leaching loss following application of organic manures to sandy soils in arable cropping, *Soil Use and Management* (Band 14), Nr. 3, Seite 123-130.
- BEHR, A. und PÖTTER, U. (2014): Einführung in die Statistik mit R, Vahlen Verlag, München, 269 Seiten.
- BISDOM, E. B. A.; DEKKER, L. W. und SCHOUTE, J. F. T. (1993): Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure, *Geoderma* (Band 56), Nr. 1-4, Seite 105-118.
- BLANK, B.; PAULSEN, H. M.; KASSOW, A.; RAHMANN, G. und AULRICH, K. (2011): Zusammensetzung von Wirtschaftsdüngern ökologischer und konventioneller Milchviehbetriebe im Rahmen des Projekts Klimawirkungen und Nachhaltigkeit von Landbausystemen, 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau (16.-18.03.2011), Gießen, Seite 199-202.
- BLUMAT (2016), aufgerufen am 12.10.2016, www.blumat.de, bambach GbR, Peter-Spring-Str. 18, 65366 Geisenheim.

- BLUME, H. P.; STAHR, K. und LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in Pedologisches Arbeiten für Ökologen, Insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler, Spektrum, Heidelberg, 255 Seiten.
- BODENSYSTEMATIK, AG (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland (Band 5), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 438 Seiten.
- BÖHME, M.; PINKER, I.; GRÜNEBERG, H. and HERFORT, S. (2010): Sheep Wool as Fertiliser for Vegetables and Flowers in Organic Farming, XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on ISHS Acta Horticulturae 933, Seite 195-202.
- BUCHGRABER, K. und RESCH, R. (1997): Konservierung von Preßtrebern sowie deren Einsatz in der Rinderfütterung 1. Mitteilung: Konservierung von abgepreßtem Biertreber, Die Bodenkultur (Band 33), Nr. 48, Seite 1-5.
- BURKHARD, C. (1863): Ueber das richtige Verhältniss in Anwendung der sogenannten künstlichen oder käuflichen Düngemittel zu den natürlichen, insbesondere dem Stallmist., Verlag von Carl Gießels, Bayreuth, 30 Seiten.
- CHANG, C. and ENTZ, T. (1996): Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in southern Alberta, Journal of Environmental quality (Band 25), Nr. 1, Seite 145-153.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2009): Landwirtschaft und Klimawandel, Geographische Rundschau (Band 9), Seite 28-35.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2011): Der Einfluss des Klimawandels auf den Wirtschaftssektor Landwirtschaft, Klimabericht für die Metropolregion Hamburg, Seite 211-227, Springer, Berlin, Heidelberg. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16035-6_9.
- DECKER, R.; RAŠKOVIĆ, S. und BRUNSIEK, K. (2010): Diskriminanzanalyse, Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse, Seite 495-523, Springer, Universität Mannheim.
- DIEPENBROCK, W.; ELLMER, F. und LÉON, J. (2005): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: 101 Tabellen, Eugen Ulmer, Stuttgart, 340 Seiten.
- DILLING, S. (2016): Analyse des Wurzelwachstums von Zea mays L. in Abhängigkeit von der Nährstoffbereitstellung durch Schafwolle, Humboldt Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Bachelor Thesis.
- DOERR, S. H. (1998): On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils, Earth Surface Processes and Landforms (Band 23), Nr. 7, Seite 663-668.

- DULLER, C. (2008): Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R: Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch, Springer, Linz, 308 Seiten.
- DÜWEL, O.; SIEBNER, C. S.; UTERMANN, J. und KRONE, F. (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands, FISBo BGR, Nr. 61, aufgerufen am 07.08.2016: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Humusgehalte_Bericht.pdf?__blob=publicationFile.
- EDER, J. und KRÜTZFELDT, B. (2000): Einfluss des Reifestadiums auf Ertrag und Qualitätsmerkmale von Silomais, Pflanzenbauwissenschaften (Band 4), Nr. 2, Seite 65-71.
- EG (1998): Entscheidung der Kommission zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens für Bodenverbesserungsmittel (98/488/EG), Europäische Gemeinschaft, aufgerufen am 12.12.2016, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A31998D0488>.
- EHLERS, W. (2013): Wieviel Wasser braucht der Mais, Mais (Band 1), Seite 8-9.
- EIJKELKAMP (2016): Soil & Water, aufgerufen am 12.10.2016, <https://de.eijkelkamp.com>, Nijverheidsstraat 30, 6987 EM Giesbeek, The Netherlands.
- EITZINGER, J.; KERSEBAUM, K. C. und FORMAYER, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel, Universität für Bodenkultur Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt, Institut für Meteorologie, Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die land- und forstwirtschaftlichen Betriebe in Mitteleuropa, AgriMedia, Universität für Bodenkultur Wien, 376 Seiten.
- FARACK, M.; DEGNER, J.; GUDDAT, C.; ZORN, W.; REICH, J.; GÖTZ, R. und SCHWABE, I. (2008): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterweizen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Band 6). URL: <http://www.tll.de/ainfo/archiv/weiz0508.pdf>.
- FEDEROLF, C.-P.; WESTERSCHULTE, M.; OLFS, H.-W.; BROLL, G. und TRAUTZ, D. (2016): Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany, European Journal of Agronomy (Band 75), Seite 130-138.
- FEIL, B. und BÄNZIGER, M. (1999): Beziehungen zwischen dem Kornertrag und den Konzentrationen von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten, Pflanzenbauwissenschaften (Band 3), Nr. 1, Seite 1-8.
- FINCK, A. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten, Die Bodenkultur (Band 58), Seite 113.
- FLORAPELL (2016): florapell der ökologische Langzeitdünger, aufgerufen am 20.07.2016, <http://www.schafwollpellets.de/>.
- FOIS, S.; MOTZO, R. and GIUNTA, F. (2009): The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development, Field Crops Research (Band 110), Nr. 1, Seite 69-75.

- FRIEDMAN, J.; HASTIE, T. and TIBSHIRANI, R. (2001): The elements of statistical learning (Band 1), Springer series in statistics, Berlin, 745 Seiten.
- GÓRECKI, R. S. and GÓRECKI, M. T. (2010): Utilization of waste wool as substrate amendment in pot cultivation of tomato, sweet pepper, and eggplant, Polish Journal Environmental Studies (Band 19), Nr. 5, Seite 1083-1087.
- GRÜTER, M. (2015): Bodenstruktur sandiger Böden, Methodische Untersuchungen zum Penetrationswiderstand, Einfluss verschiedener Bodennutzungssysteme, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Humboldt Universität zu Berlin, Master Thesis.
- GURWICK, N. P.; MOORE, L. A.; KELLY, C. and ELIAS, P. (2013): A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability in situ and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy, PLoS ONE (Band 8), Nr. 9.
URL: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0075932>.
- GUTZLER, C.; HELMING, K.; BALLA, D.; DANNOWSKI, R.; DEUMLICH, D.; GLEMNITZ, M.; KNIERIM, A.; MIRSCHEL, W.; NENDEL, C.; PAUL, C.; SIEBER, S.; STACHOW, U.; STARICK, A.; WIELAND, R.; WURBS, A. and ZANDER, P. (2015): Agricultural land use changes – a scenario-based sustainability impact assessment for Brandenburg, Germany, Ecological Indicators (Band 48), Seite 505-517.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14004129>.
- HALLER, M. Y.; MÜLLER, S. R.; MCARDELL, C. S.; ALDER, A. C. and SUTER, M. J.-F. (2002): Quantification of veterinary antibiotics (sulfonamides and trimethoprim) in animal manure by liquid chromatography–mass spectrometry, Journal of Chromatography A (Band 952), Nr. 1, Seite 111-120.
- HARTGE, K. H.; HORN, R.; BACHMANN, J. und PETH, S. (2014): Einführung in die Bodenphysik (Band 4), 372 Seiten, Schweizerbart, Stuttgart.
- HAYNES, R. J. and NAIDU, R. (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review, Nutrient Cycling in Agroecosystems (Band 51), Nr. 2, Seite 123-137.
URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009738307837>.
- HILLEL, D. and ROSENZWEIG, C. (2011): Handbook of climate change and agroecosystems (Band 1), World Scientific, Imperial College Press, Columbia University USA, 429 Seiten.
- HOFF, K.; HOTHORN, L. A. und ENGLUND, J.-E. (2008): R-Handbuch für Biostatistik, Bioinformatik, Universität Hannover, 116 Seiten.
- HOFFMANN, T. und RÖDEL, R. (2004): Leitfaden für die statistische Auswertung geographischer Daten, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 110 Seiten.
- HUSTVEDT, G.; MEIER, E. und WALICZEK, T. (2016): The Feasibility of Large-Scale Composting of Waste Wool, Green Fashion: Volume 1, Seite 95-107, Springer Singapore. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-0111-6_4.

- KABACOFF, R. (2015): R in action: data analysis and graphics with R, Manning Publications Co, 472 Seiten.
- KADAM, V. V.; MEENA, L. R. ; SINGH, S.; SHAKYAWAR, D. B. and NAQVI, S. M. K. (2014): Utilization of coarse wool in agriculture for soil moisture conservation, Indian Journal of Small Ruminants (Band 20), Nr. 2, Seite 83-86.
- KEUSKAMP, J. A.; DINGEMANS, B. J. J.; LEHTINEN, T.; SARNEEL, J. M. and HEFTING, M. M. (2013): Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems, Methods in Ecology and Evolution (Band 4), Nr. 11, Seite 1070-1075. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/2041-210X.12097>.
- KNITTEL, H.; ALBERT, E.; EBERTSEDER, T. und FRITSCH, F. (2003): Praxishandbuch Dünger und Düngung, 1. Auflage, 312 Seiten, Agrimedia.
- KONOPATZKI, P. (2013): Ausgewählte Bodenverbesserungsmittel zur Erhöhung der Nährstoff- und Wasserspeicherfähigkeit von Substraten, Landwirtschaftlich Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Pflanzenernährung, Humboldt Universität zu Berlin, Bachelor Thesis.
- KORJENIC, A.; ZACH, J. und HROUDOVÁ, J. (2014): Schafwolle als alternativer Wärmedämmstoff und ihr hygrothermisches Verhalten, Bauphysik (Band 36), Nr. 5, Seite 249-256. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201410037>.
- KÜBLER, E. (1994): Weizenanbau: 72 Tabellen, Ulmer, Stuttgart, 191 Seiten.
- KUMAR, A.; SINGH, R. und CHHILLAR, R. (2008): Influence of omitting irrigation and nitrogen levels on growth, yield and water use efficiency of coriander (*Coriandrum sativum* L.), Acta Agronomica Hungarica (Band 56), Nr. 1, Seite 69-74.
- KUZYAKOV, Y.; BOGOMOLOVA, I. und GLASER, B. (2014): Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis, Soil Biology and Biochemistry (Band 70), Seite 229-236. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071713004653>.
- LEHMANN, J. and JOSEPH, S. (2015): Biochar for environmental management: science, technology and implementation, Taylor and Francis Ltd, London, 944 Seiten.
- LELF (2000): Rahmenempfehlungen zur Düngung im Land Brandenburg, Herausgeber Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg, 88 Seiten.
- LIEBEREI, R.; FRANKE, W. und REISDORFF, C. (2007): Nutzpflanzenkunde: 118 Tabellen, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New-York, 509 Seiten.
- LIU, J.; SCHULZ, H.; BRANDL, S.; MIEHTKE, H.; HUWE, B. and GLASER, B. (2012): Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions, Journal of Plant Nutrition and Soil Science (Band 175), Nr. 5, Seite 698-707.

- LUTZE, G. W.; DALCHOW, C.; TRIPPMACHER, M.; ALBRECHT, L. und KIESEL, J. (2014): Naturräume und Landschaften in Brandenburg und Berlin, be.bra wissenschaftsverlag GmbH, Berlin, 160 Seiten.
- LUX, G. und SCHMIDTKE, K. (2011): Kurzfristige Wirkungen organischer Düngemittel mit unterschiedlichem C/N-Verhältnis auf den Ertrag der Ackerbohne (*Vicia faba* L.) und Folgefrucht Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) sowie Unkrautwachstum, 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Gießen, 15.-18. März 2011, 259 Seiten.
- LWK NRW (2015): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium, Nordrhein-Westfalen, Landwirtschaftskammer. Homepage, aufgerufen am: 21.06.2016
<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf>.
- LWK NRW (2016): Steckbrief Energiepflanzen, Pflanzen für die Produktion von Biogas, Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Seite 682, aufgerufen am 21.06.2016
<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/steckbrief-mais.pdf>.
- MATHIAS DOS SANTOS, T. R. ; ALEXANDRE, V. M. F.; CAMMAROTA, M. C.; MORETZSOHN DE MELLO, P. P. and SÉRVULO, E. F. C. (2015): Characterization and determination of brewer's solid wastes composition, Journal of the Institute of Brewing (Band 121), Nr. 3, Seite 400-404.
- MATHIAS DOS SANTOS, T. R. ; MORETZSOHN DE MELLO, P. P. and SERVULO, E. F. C. (2014): Solid wastes in brewing process: A review, Journal of Brewing and Distilling (Band 5), Nr. 1, Seite 1-9.
- MAUSER, W. (2007): Wie lange reicht die Ressource Wasser, Grundwasser (Band 1), FischerVerlag, Bonn, 256 Seiten.
- MBAGWU, J .S. C. (1989): Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical Ultisol, Biological wastes (Band 28), Nr. 1, Seite 1-13.
- MBAGWU, J. S. C. and EKWEALOR, G. C. (1990): Agronomic potential of brewers' spent grains, Biological wastes (Band 34), Nr. 4, Seite 335-347.
- MENG, L.; DING, W. und CAI, Z. (2005): Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil, Soil Biology and Biochemistry (Band 37), Nr. 11, Seite 2037-2045.
 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071705001343>.
- MENGEL, K (2013): Stickstoff, Pflanzenernährung (Band 1), 394 Seiten, Springer, Gießen.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.; KOSEGARTEN, H. and APPEL, T. (2001): Nitrogen, Principles of plant nutrition, Seite 397-434, Springer, Gießen.
- MINOLTA, Konica (2009): A lightweight handheld meter for measuring the chlorophyll content of leaves without causing damage to plant, aufgerufen am 20.04.2016:
https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/2_Products/1_Colour_Measurement/6_Chlorophyll_Meter/PDF/Spad502plus_EN.pdf.

- MLUL (2016): Agrarbericht Brandenburg: „Die Herausforderungen der brandenburgischen Streusandbüchse“, MLUL, aufgerufen am 18.04.2016:
<http://agrarbericht.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.363884.de>.
- MUCHOVEJ, R. M. C. and PACOVSKY, R. S. (1997): Future Directions of By-Products and Wastes in Agriculture, Agricultural Uses of By-Products and Wastes (Band 668), Seite 1-19, American Chemical Society. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/bk-1997-0668.ch001>.
- MÜNCH, T.; BERG, M.; MIRSCHEL, W.; WIELAND, R. and NENDEL, C. (2014): Considering cost accountancy items in crop production simulations under climate change, European Journal of Agronomy (Band 52, Part A), Seite 57-68.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030113000063>.
- NENDEL, C.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W. and WENKEL, K. O. (2014): Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model, European Journal of Agronomy (Band 52, Part A), Seite 47-56.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030112001323>.
- NUSTOROVA, M.; BRAIKOVA, D.; GOUSTEROVA, A.; VASILEVA-TONKOVA, E. und NEDKOV, P. (2006): Chemical, microbiological and plant analysis of soil fertilized with alkaline hydrolysate of sheep's wool waste, World Journal of Microbiology and Biotechnology (Band 22), Nr. 4, Seite 383-390. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11274-005-9045-9>.
- PELL, A. N. (1997): Manure and Microbes: Public and Animal Health Problem?, Journal of Dairy Science (Band 80), Nr. 10, Seite 2673-2681.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030297762271>.
- PETZOLDT, T. (2009): Datenanalyse mit R Ausgewählte Beispiele, aufgerufen am 22.10.2016,
http://www.simecol.de/courses/elements_de.pdf.
- POERSCHMANN, J.; WEINER, B.; WEDWITSCHKA, H.; BASKYR, I.; KOEHLER, R. and KOPINKE, F.-D. (2014): Characterization of biocoals and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of brewer's spent grain, Bioresource technology (Band 164), Seite 162-169.
- PREMACHANDRA, G. S.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. and OGATA, S. (1993): Water stress and potassium fertilization in field grown maize (*Zea mays* L.): effects on leaf water relations and leaf rolling, Journal of Agronomy and Crop Science (Band 170), Nr. 3, Seite 195-201.
- RAJKOVICH, S.; ENDERS, A.; HANLEY, K.; HYLAND, C.; ZIMMERMAN, A. R. and LEHMANN, J. (2012): Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil, Biology and Fertility of Soils (Band 48), Nr. 3, Seite 271-284. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7>.
- RATH, J. (2016): DMK, Deutsches Maiskomitee e.V., aufgerufen am 23.07.2016,
<http://www.maiskomitee.de>

- REIBE, K.; ROß, C.-L. and ELLMER, F. (2015): Hydro-/Biochar application to sandy soils: impact on yield components and nutrients of spring wheat in pots, *Archives of Agronomy and Soil Science* (Band 61), Nr. 8, Seite 1055-1060.
- RIBOLDI, L. B.; OLIVEIRA, R. F. und ANGELOCCI, L. R. (2016): Leaf turgor pressure in maize plants under water stress, *Australian Journal of Crop Science* (Band 10), Nr. 6, Seite 878.
- ROTH, R. (2014): Einfluß differenzierter Wasserversorgung in einzelnen Ontogeneseabschnitten auf den Ertrag von Silomais (*Zea mays* L.) und Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L.), *Hercynia-Ökologie und Umwelt in Mitteleuropa* (Band 26), Nr. 2, Seite 173-181.
- ROWELL, D. L. (2013): *Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*, Springer, Reading, United Kingdom.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. und Wilke, B.-M., (2013): *Lehrbuch der Bodenkunde* (Band 16), Spektrum, Heidelberg.
- SCHITTENHELM, S. (2009): Wassernutzungseffizienz von Energiepflanzen, Symposium Energiepflanzen, Berlin. aufgerufen am 25.05.2016, http://www.eva-verbund.de/uploads/media/Energiepflanzen-symposium_Berlin_2009_Schittenhelm.pdf.
- SCHREIBER, P. (1992): Einfluss der Wasser- und Nährstoffversorgung auf die Kolbenbildung und den Kornertrag von Mais (*Zea mays* L.), Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 9664.
- SCHROEDER, J. H. und NOWEL, W. (2001): *Führer zur Geologie von Berlin und Brandenburg* (Band 2), GEOZON Science, Berlin.
- SCHUCHARDT, F. und VORLOP, K.-D. (2010): Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffen in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und Einbringung von HTC-Kohle in den Boden, *Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research)* (Band 60), Nr. 4, Seite 205-212.
- SCHULTHEIß, U. und DÖHLER, H. (2012): Lagerung von Festmist in der Feldflur auf unbefestigtem Untergrund, *LANDTECHNIK—Agricultural Engineering* (Band 67), Nr. 2, Seite 133-135.
- SCHULTHEIß, U.; DÖHLER, H. und SCHWAB, M. (2010): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft—jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland, *LANDTECHNIK—Agricultural Engineering* (Band 65), Nr. 5, Seite 354-356.
- SCHWEITZER, K. (2014): Humboldt Universität zu Berlin, Lehr- und Forschungsstation, Bereich Freiland, Standort Dahlem, aufgerufen am 05.08.2016, <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/einrichtungen/freiland/dahlem/standardseite>.
- SHACKLEY, S.; HAMMOND, J.; GAUNT, J. and IBARROLA, R. (2011): The feasibility and costs of biochar deployment in the UK, *Carbon management* (Band 2), Nr. 3, Seite 335-356.

- SIMS, J. T. (1997): Agricultural and Environmental Issues in the Management of Poultry Wastes: Recent Innovations and Long-Term Challenges, Agricultural Uses of By-Products and Wastes (Band 668), Seite 72-90, American Chemical Society.
URL: <http://dx.doi.org/10.1021/bk-1997-0668.ch006>.
- SMIRNOVA, N.; DEMYAN, M. S.; RASCHE, F.; CADISCH, G. and MÜLLER, T. (2014): Calibration of CO₂; Trapping in Alkaline Solutions during Soil Incubation at Varying Temperatures Using a Respicond VI, Open Journal of Soil Science (Band 4 und 5), Seite 161-167.
URL: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=45509>.
- SOHI, S.; LOPEZ-CAPEL, E.; KRULL, E. and BOL, R. (2009): Biochar, climate change and soil: A review to guide future research, Land and Water Science Report (Band 5), Nr. 09, Seite 17-31.
- SOLLIEC, M.; ROY-LACHAPELLE, A.; GASSER, M.-O.; COTÉ, C.; GÉNÉREUX, M. and SAUVÉ, S. (2016): Fractionation and analysis of veterinary antibiotics and their related degradation products in agricultural soils and drainage waters following swine manure amendment, Science of The Total Environment (Band 543), Seite 524-535.
- SRADNICK, A.; OLTMANNS, M.; RAUPP, J. and JOERGENSEN, R. G. (2014): Microbial residue indices down the soil profile after long-term addition of farmyard manure and mineral fertilizer to a sandy soil, Geoderma (Band 226–227), Seite 79-84.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611400113X>.
- SÜMER, M. R. (2013): Auswirkungen verschiedener Bodennutzungssysteme auf ausgewählte physiko-chemische Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Parameter in Berlin-Dahlem und Dedelow, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, 190 Seiten.
- SURUCHI, G.; ANSHUMALA, S.; SARIKA, S. and NARINDRA, B. (2014): Growth, macro and micronutrient concentration in clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba*), plant tissue as well as in soil when amended with wool as fertilizer, Journal of Environmental Research and Development (Band 8), Nr. 3A, Seite 607-613.
- TEICHMANN, I. (2014): Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten, DIW-Wochenbericht (Band 81), Nr. 1/2, Seite 3-13.
URL: <http://www.econstor.eu/handle/10419/90632>.
- TERHOEVEN-URSELMANS, T.; SCHELLER, E.; RAUBUCH, M.; LUDWIG, B. and JOERGENSEN, R. G. (2009): CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley, Applied Soil Ecology (Band 42), Nr. 3, Seite 297-302.
- TIWARI, V. N.; PATHAK, A. N. and LEHRI, L. K. (1989): Response to differently amended wool-waste composts on yield and uptake of nutrients by crops, Biological Wastes (Band 28), Nr. 4, Seite 313-318.

- UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUJIMAKI, H.; ZAHOR, A. and NISHIHARA, E. (2011): Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition, *Soil Use and Management* (Band 27), Nr. 2, Seite 205-212.
URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>.
- UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; ZAHOR, A. and NISHIHARA, E. (2011): Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention, *J. Food Agric. Environment* (Band 9), Nr. 3 u. 4, Seite 1137-1143.
- VAN FAASSEN, H. G. (2013): Diskussionsbeitrag: Orientierende Versuche zur Kompostierung von Schweinegülle und Stroh, *Grundlagen der Landtechnik* (Band 28), Nr. 2, Seite 83-87.
- VAN GENUCHTEN, M. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal* (Band 44), Nr. 5, Seite 892-898.
- VIGER, M.; HANCOCK, R. D.; MIGLIETTA, F. and TAYLOR, G. (2015): More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar, *GCB Bioenergy* (Band 7), Nr. 4, Seite 658-672.
URL: <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12182>.
- VONCINA, A. (2013): Sheep wool and leather waste as fertilizers in organic production of asparagus (*Asparagus officinalis* L.)/OVcJA VOLNA IN OSTRUZKI USNJA KOT GNOJILI V EKOLOSKI PRIDELAVI SPARGLJA (*Asparagus officinalis* L.), *Acta Agriculturae Slovenica* (Band 101), Nr. 2, Seite 191.
- WEBER, E. und BLEIHOLDER, H. (1990): Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse-mit Abbildungen, *Gesunde Pflanzen* (Band 42), Nr. 9, Seite 308-321.
- WENZINGER, B. (2013): Leistungsminderung und hohe Zellzahlen in einer Milchviehherde nach Verfütterung von hohen Mengen an Biertreber, *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* (Band 155), Nr. 9, Seite 515-519.
- WIELAND, H. und BOCKISCH, F.-J. (2003): Deutsche Schafwolle - Dämmstoff der Zukunft? (Band 58), Nr. 4, Seite 2. URL: <http://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/view/2003-4-260-261/2642>.
- WILD, A. und SCHMITT, V. (2012): Photosynthese II: Substanzumwandlung und Ökologie der Photosynthese, *Biochemische und physiologische Versuche mit Pflanzen* Seite 211-264, Springer Berlin, Heidelberg.
- WOLFE, D.; HENDERSON, D.; HSIAO, T. and ALVINO, A. (1988): Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves, *Agronomy Journal* (Band 80), Nr. 6, Seite 865-870.
- WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J. and JOSEPH, S. (2010): Sustainable biochar to mitigate global climate change, *Nature Communication* (Band 1), Seite 56. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1053>.

- WULFEN, U.; ROSCHKE, M. und KAPE, H.-E. (2008): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV), LVLF. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung (LVLF) Referat Ackerbau und Grünland, Nr. 87, aufgerufen am 15.07.2016, http://www.isip.de/coremedia/generator/Inhalt/Nachrichten/Deutschland/Brandenburg/Fachinformationen_20D_C3_BCngung/Brosch_C3_BCren/Richtwerte.property=Dokument.pdf.
- ZAHN, H.; WORTMANN, F.-J. und HÖCKER, H. (1997): Chemie und Aufbau der Wolle, Chemie in unserer Zeit (Band 31), Nr. 6, Seite 280-290. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.19970310604>.
- ZHELJAZKOV, V. D. (2005): Assessment of Wool Waste and Hair Waste as Soil Amendment and Nutrient Source, Journal of Environmental Quality (Band 34), Nr. 6, Seite 2310-2317. URL: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2004.0332>.
- ZHELJAZKOV, V. D.; STRATTON, G. W.; PINCOCK, J.; BUTLER, S.; JELIAZKOVA, E. A.; NEDKOV, N. K. and GERARD, P. D. (2009): Wool-waste as organic nutrient source for container-grown plants, Waste management (Band 29), Nr. 7, Seite 2160-2164.
- ZIDAN, A. and ELEWA, M. (1994): Effect of NaCl salinity on the rate of germination, seedling growth, and some metabolic changes in four plant species (umbelliferae), Der Tropenlandwirt-Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics (Band 95), Nr. 1, Seite 87-97.
- ZIMMERMAN, A. R.; GAO, B. and AHN, M.-Y. (2011): Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils, Soil Biology and Biochemistry (Band 43), Nr. 6, Seite 1169-1179. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071711000769>.
- ZOCCOLA, M.; MONTARSOLO, A.; MOSSOTTI, R.; PATRUCCO, A. and TONIN, C. (2014): Green hydrolysis conversion of wool wastes into organic nitrogen fertilisers, 2nd international conference on sustainable solid waste management, National Research Council, Institute for Macromolecular Studies, Biella, Italien.

Anhang

Tabellenverzeichnis Anhang

Tab. A 1:	Kulturen und Behandlungen der Versuchsfläche FU 7/8 der Jahre 2011 bis 2013	133
Tab. A 2:	Versuchsreihe 1 Längenwachstum in cm des Korianders über die Zeit (\bar{x} = arithmetischer Mittelwert, σ = Standardabweichung).....	133
Tab. A 3:	Versuchsreihe 2 Längenwachstum in cm des Korianders über die Zeit (\bar{x} = arithmetischer Mittelwert, σ = Standardabweichung).....	135
Tab. A 4:	Methodenübersicht der Bestimmung der chemischen Parameter für die Pflanzen-, Rohstoff- und Bodenproben.....	138
Tab. A 5:	Beginn und Ende der normalisierten Turgorwerte der Versuchsreihen 1 bis 3 im Gewächshaus (P=Schafwollpellets; W=Wolle; T=Biertreber; K=Kontrolle; D=NPK Dünger; b=bewässert, t=trocken)	143
Tab. A 6:	VR 1 Mais 2014 Korrelationskoeffizienten der normalisierten Turgorwerte und Bodenfeuchten sowie der normalisierten Turgorwerte und Lufttemperatur	145
Tab. A 7:	VR 2 Sommerweizen 2014 chemische Analysen der Pflanzenmasse Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken).....	147
Tab. A 8:	VR 2 Sommerweizen 2014 chemische Analysen der Pflanzsubstrate (Boden) im Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken).....	147
Tab. A 9:	VR 3 Mais 2015 Nährstoffgehalte Stroh (b=bewässert, t=trocken; n=2)	150
Tab. A 10:	VP 1 Sommerweizen 2014 Entwicklung nach BBCH-Codierung, MW (SD=0 bis 1,66; n=4).....	152
Tab. A 11:	VP 1 Sommerweizen 2014 Ernteparameter der Freilandversuche (rot=aus Meterenden abgeleitet).....	154
Tab. A 12:	VP 1 Sommerweizen 2014 Eingangsparameter der Clusteranalysen	155

Tab. A 13:	VP 2 Winterweizen 2015 Entwicklung nach BBCH-Codierung, MW (SD=0 bis 3,5; n=4).....	156
Tab. A 14:	VP 2 Winterweizen 2015 Ernteparameter der Freilandversuche	156
Tab. A 15:	VP 2 Winterweizen 2015 chemische Analysen Korn; n=2	158
Tab. A 16:	VP 2 Winterweizen 2015 bodenchemische Kennwerte; n=2	159
Tab. A 17:	VP 2 Winterweizen 2015 Eingangsparameter Clusteranalysen	160

Abbildungsverzeichnis Anhang

A 1:	Oberboden (Ap-Horizont) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse.....	139
A 2:	Schafwollpellets (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse.....	140
A 3:	Rohwolle (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse.....	141
A 4:	Biertreber (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse.....	142
A 5:	VR 1 Mais 2014 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=15)	144
A 6:	VR 1 Mais 2014 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=15)	144
A 7:	VR 1 Mais 2014 mittlerer Chlorophyllgehalt vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=150)	145
A 8:	VR 2 Sommerweizen 2014 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 06.11.2014; (n=15)	146
A 9:	VR 2 Sommerweizen 2014 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 06.11.2014; (n=15).....	146
A 10:	VR 2 Sommerweizen 2014 Kaliumgehalte [mg/100g] des Bodens nach der Ernte im Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken; n=2)	147
A 11:	VR 3 Mais 2015 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (n=10)	148
A 12:	VR 3 Mais 2015 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (n=10)	148

A 13:	VR 3 Mais 2015 Summe des mittleren Wasserverbrauchs der Versuchsvarianten ab Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (b=bewässert, t=trocken; n=5)	149
A 14:	VR 3 Mais 2015 mittlerer Chlorophyllgehalt der Versuchsvarianten (b=bewässert, t=trocken; n= 50); WMB =Wassermangelbedingungen.....	149
A 15:	VR 3 Mais 2015 Gehalte an Makronährstoffen im Boden (b= bewässert, t= trocken; n=2)	150
A 16:	Versuchsplan der Freilandversuchsfläche FU 7/8 am Standort Berlin-Dahlem.....	151
A 17:	VP 1 Sommerweizen 2014 Dendrogramm der bodenchemischen Parameter	155
A 18:	VP 2 Winterweizen 2015 ermittelte MW der C/N-Verhältnisse des Bodens der Plots über die Tiefe; n=8 (Probennahme 3 Tage nach der Ernte).....	160
A 19:	VP 2 Winterweizen 2015 Dendrogramm der Ernteparameter	161
A 20:	VP 2 Winterweizen 2015 Dendrogramm der chemischen Analyse Korn.....	161

Tab. A 1: Kulturen und Behandlungen der Versuchsfläche FU 7/8 der Jahre 2011 bis 2013

	Erntejahr 2013	Erntejahr 2012	Erntejahr 2011
Fruchtart	Winterweizen	Futtererbsen	Winterweizen
Mineralische Düngung	10.04.2013 80 kg ha ⁻¹ N als KAS ohne P ohne K	keine Mineralische Düngung	21.03.2011 120 kg ha ⁻¹ Alzon
Organische Düngung	keine	keine	keine
Stroh	abgefahren	Erbsenstroh wurde gemulcht	abgefahren
Zwischenfruchtanbau	Ja (DSV- Saat-Mischung)	keine	Ja (Weißer Senf)
Herbizid	09.11.2012 1,50 l ha ⁻¹ Picon + 0,015 kg ha ⁻¹ Lexus	21.03.2012 1,80 l ha ⁻¹ Stomp Aqua + 2,50 l ha ⁻¹ Boxer	30.03.2011 0,070 kg ha ⁻¹ Biathlon + 1,0 l ha ⁻¹ Starane XL
Fungizid	keine	keine	keine
Insektizid	keine	keine	keine

Tab. A 2: Versuchsreihe 1 Längenwachstum in cm des Korianders über die Zeit (\bar{x} = arithmetischer Mittelwert, σ = Standardabweichung)

Nr.	Variante [M.-%]	27.03.2014	31.03.2014	02.04.2014	08.04.2014	10.04.2014	15.04.2014
1	L.N. 0,1	2,50	2,50	3,50	3,50	3,50	3,50
2	L.N. 0,1	2,00	2,00	3,50	3,50	3,50	3,50
3	L.N. 0,1	2,00	3,00	4,00	4,00	4,50	5,50
4	L.N. 0,1	2,50	2,50	3,50	4,50	4,50	4,50
	\bar{x}	2,25	2,50	3,63	3,88	4,00	4,25
	σ	0,25	0,35	0,22	0,41	0,50	0,83
5	L.N. 0,5	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00	0,00
6	L.N. 0,5	1,00	1,50	2,50	2,50	2,50	0,00
7	L.N. 0,5	1,50	1,50	3,00	3,00	3,00	0,00
8	L.N. 0,5	0,50	1,50	2,50	2,50	2,50	0,00
	\bar{x}	0,88	1,38	2,50	2,50	2,50	0,00
	σ	0,41	0,22	0,35	0,35	0,35	0,00
9	L.N. 1	0,50	1,50	2,50	2,50	2,50	0,00
10	L.N. 1	1,00	1,50	2,50	2,50	2,50	0,00
11	L.N. 1	1,00	1,50	2,50	2,50	1,50	0,00
12	L.N. 1	0,50	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00
	\bar{x}	0,75	1,38	2,38	1,88	1,63	0,00
	σ	0,25	0,22	0,22	1,08	1,02	0,00
13	L.N. 2	0,50	1,00	2,00	2,00	2,00	0,00
14	L.N. 2	0,50	1,00	2,00	2,00	1,50	0,00
15	L.N. 2	0,50	1,00	2,00	2,00	1,50	0,00
16	L.N. 2	1,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00
	\bar{x}	0,63	1,00	2,00	1,50	1,25	0,00
	σ	0,22	0,00	0,00	0,87	0,75	0,00

Nr.	Variante [M.-%]	27.03.2014	31.03.2014	02.04.2014	08.04.2014	10.04.2014	15.04.2014
17	L.T. 0,1	1,50	2,50	3,50	3,50	3,50	3,50
18	L.T. 0,1	1,50	2,50	4,00	5,00	5,00	6,00
19	L.T. 0,1	1,50	2,50	4,00	4,50	6,00	6,50
20	L.T. 0,1	2,50	3,50	5,00	5,00	5,00	5,00
	\bar{x}	1,75	2,75	4,13	4,50	4,88	5,25
	σ	0,43	0,43	0,54	0,61	0,89	1,15
21	L.T. 0,5	3,00	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00
22	L.T. 0,5	2,50	3,50	4,50	4,50	4,50	4,50
23	L.T. 0,5	2,50	3,50	5,00	5,00	5,00	5,00
24	L.T. 0,5	1,50	1,50	3,00	3,50	4,50	4,50
	\bar{x}	2,38	3,13	4,38	4,50	4,75	4,75
	σ	0,54	0,96	0,82	0,61	0,25	0,25
25	L.T. 1	2,50	3,50	5,00	5,50	5,50	5,50
26	L.T. 1	2,00	3,50	5,00	6,00	6,00	6,00
27	L.T. 1	1,50	1,50	3,00	3,50	4,00	4,00
28	L.T. 1	1,50	3,00	5,00	5,50	5,50	5,50
	\bar{x}	1,88	2,88	4,50	5,13	5,25	5,25
	σ	0,41	0,82	0,87	0,96	0,75	0,75
29	L.T. 2	3,00	4,50	7,00	7,00	7,00	7,00
30	L.T. 2	1,50	2,50	4,00	6,00	6,50	6,50
31	L.T. 2	2,00	2,50	5,00	5,00	6,00	7,00
32	L.T. 2	1,00	2,00	3,00	5,50	6,50	7,00
	\bar{x}	1,88	2,88	4,75	5,88	6,50	6,88
	σ	0,74	0,96	1,48	0,74	0,35	0,22
33	Kontrolle	1,50	2,00	3,00	3,50	4,00	4,00
34	Kontrolle	2,00	2,50	4,00	4,50	4,50	4,50
35	Kontrolle	2,50	2,50	3,50	4,00	4,00	4,00
36	Kontrolle	2,00	2,50	3,50	4,00	4,00	4,00
	\bar{x}	2,00	2,38	3,50	4,00	4,13	4,13
	σ	0,35	0,22	0,35	0,35	0,22	0,22
37	Pellets 0,1	2,50	4,50	6,00	8,00	8,00	11,00
38	Pellets 0,1	3,50	4,50	5,50	7,50	7,50	11,00
39	Pellets 0,1	1,50	3,50	5,00	6,50	6,50	11,00
40	Pellets 0,1	3,50	4,50	6,00	8,00	9,50	13,00
	\bar{x}	2,75	4,25	5,63	7,50	7,88	11,50
	σ	0,83	0,43	0,41	0,61	1,08	0,87
41	Pellets 0,5	3,00	5,50	6,50	7,50	8,50	10,50
42	Pellets 0,5	2,50	4,50	8,00	8,50	8,50	12,00
43	Pellets 0,5	4,00	5,00	8,00	8,50	9,00	13,00
44	Pellets 0,5	3,50	5,50	8,00	9,00	10,00	13,00
	\bar{x}	3,25	5,13	7,63	8,38	9,00	12,13
	σ	0,56	0,41	0,65	0,54	0,61	1,02
45	Pellets 1	3,50	5,00	8,00	9,00	9,00	12,00
46	Pellets 1	3,50	5,50	8,00	8,50	8,50	12,00

Nr.	Variante [M.-%]	27.03.2014	31.03.2014	02.04.2014	08.04.2014	10.04.2014	15.04.2014
47	Pellets 1	3,50	4,50	6,00	6,00	6,50	10,00
48	Pellets 1	3,50	5,50	7,00	8,50	8,50	12,00
	\bar{x}	3,50	5,13	7,25	8,00	8,13	11,50
	σ	0,00	0,41	0,83	1,17	0,96	0,87
49	Pellets 2	2,50	4,00	5,00	7,00	7,50	9,00
50	Pellets 2	3,00	3,50	6,00	8,00	8,50	12,00
51	Pellets 2	3,00	4,50	7,50	7,50	8,50	12,00
52	Pellets 2	2,50	5,50	7,50	7,50	9,00	11,50
	\bar{x}	2,75	4,38	6,50	7,50	8,38	11,13
	σ	0,25	0,74	1,06	0,35	0,54	1,24
53	Treber 0,1	3,50	5,50	8,00	8,00	8,50	8,50
54	Treber 0,1	1,50	4,00	6,00	7,00	7,50	9,00
55	Treber 0,1	1,50	3,50	6,00	8,00	8,00	8,50
56	Treber 0,1	2,50	3,50	5,00	6,00	6,50	6,50
	\bar{x}	2,25	4,13	6,25	7,25	7,63	8,13
	σ	0,83	0,82	1,09	0,83	0,74	0,96
57	Treber 0,5	3,50	5,50	7,00	8,50	8,50	11,00
58	Treber 0,5	3,50	5,50	7,00	7,00	8,50	12,00
59	Treber 0,5	2,50		6,00	6,00	6,50	9,00
60	Treber 0,5	2,50	5,00	7,50	8,50	8,50	12,00
	\bar{x}	3,00	4,75	6,88	7,50	8,00	11,00
	σ	0,50	1,03	0,54	1,06	0,87	1,22
61	Treber 1	2,50	3,50	7,50	7,50	7,50	11,00
62	Treber 1	2,50	5,50	7,50	8,00	8,00	11,00
63	Treber 1	2,50	4,50	7,00	7,00	7,00	9,00
64	Treber 1	3,50	5,50	8,00	8,00	8,00	12,00
	\bar{x}	2,75	4,75	7,50	7,63	7,63	10,75
	σ	0,43	0,83	0,35	0,41	0,41	1,09
65	Treber 2	1,50	4,00	5,50	5,50	5,50	7,50
66	Treber 2	2,50	3,50	7,00	8,00	8,00	10,00
67	Treber 2	1,50	2,50	5,00	6,00	7,00	9,00
68	Treber 2	2,50	5,00	6,50	6,50	8,00	12,00
	\bar{x}	2,00	3,75	6,00	6,50	7,13	9,63
	σ	0,50	0,90	0,79	0,94	1,02	1,63

Tab. A 3: Versuchsreihe 2 Längenwachstum in cm des Korianders über die Zeit (\bar{x} = arithmetischer Mittelwert, σ = Standardabweichung)

Nr.	Variante [M.-%]	14.08.2014	15.08.2014	19.08.2014	21.08.2014	29.08.2014	08.09.2014
1	Wolle 0,1	1,50	2,00	4,00	4,50	8,00	12,00
2	Wolle 0,1	0,00	0,00	3,50	3,50	9,00	14,50
3	Wolle 0,1	0,00	0,00	2,00	2,50	7,00	12,00
4	Wolle 0,1	2,00	2,50	4,00	4,00	9,00	13,00
	\bar{x}	0,88	1,13	3,38	3,63	8,25	12,88

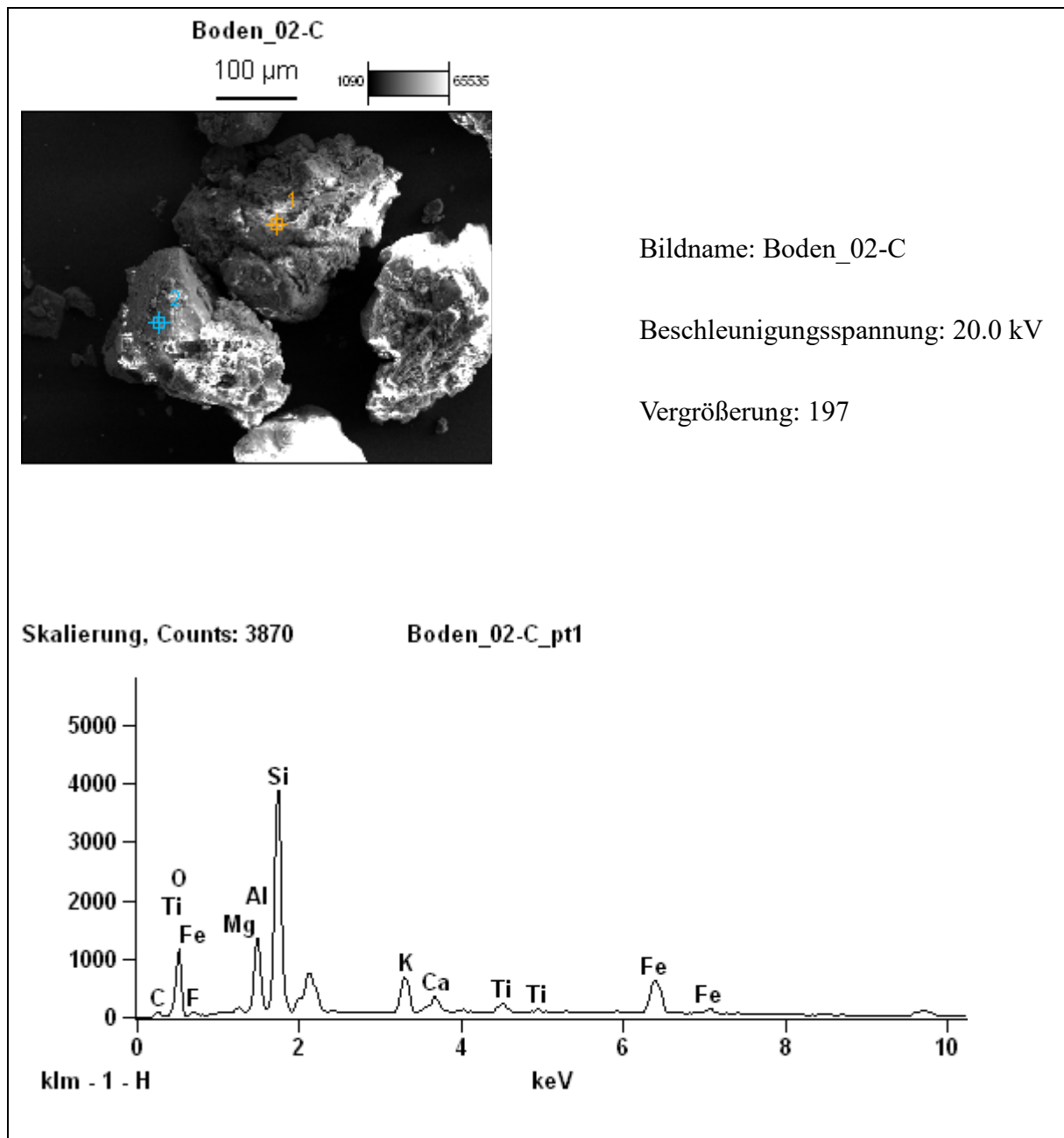
Nr.	Variante [M.-%]	14.08.2014	15.08.2014	19.08.2014	21.08.2014	29.08.2014	08.09.2014
	σ	0,89	1,14	0,82	0,74	0,83	1,02
5	Wolle 0,5	1,50	1,50	3,50	3,50	8,00	12,50
6	Wolle 0,5	1,00	1,50	4,00	4,00	8,00	12,00
7	Wolle 0,5	0,00	0,00	1,50	2,00	5,50	9,00
8	Wolle 0,5	0,00	0,00	1,00	2,00	5,00	12,00
	\bar{x}	0,63	0,75	2,50	2,88	6,63	11,38
	σ	0,65	0,75	1,27	0,89	1,39	1,39
9	Wolle 1	0,50	0,50	3,00	3,50	6,00	8,00
10	Wolle 1	2,00	2,00	3,50	3,50	7,00	10,00
11	Wolle 1	0,50	1,00	4,00	4,00	8,00	12,00
12	Wolle 1	1,00	1,50	3,00	3,00	6,00	11,00
	\bar{x}	1,00	1,25	3,38	3,50	6,75	10,25
	σ	0,61	0,56	0,41	0,35	0,83	1,48
13	Wolle 2	1,50	2,00	4,00	4,50	6,00	9,00
14	Wolle 2	2,00	2,50	4,50	4,50	7,00	11,00
15	Wolle 2	0,00	0,00	2,00	2,00	4,00	7,00
16	Wolle 2	1,50	1,50	2,50	2,50	5,50	10,00
	\bar{x}	1,25	1,50	3,25	3,38	5,63	9,25
	σ	0,75	0,94	1,03	1,14	1,08	1,48
17	Hornk. 0,1	2,00	2,00	3,00	3,00	3,50	4,50
18	Hornk. 0,1	1,50	2,00	3,50	3,50	3,50	4,50
19	Hornk. 0,1	1,00	1,50	3,00	3,00	3,50	4,50
20	Hornk. 0,1	1,50	2,00	3,50	3,50	4,00	4,00
	\bar{x}	1,50	1,88	3,25	3,25	3,63	4,38
	σ	0,35	0,22	0,25	0,25	0,22	0,22
21	Hornk. 0,5	1,50	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
22	Hornk. 0,5	1,50	2,00	3,00	3,00	4,00	5,50
23	Hornk. 0,5	1,50	2,00	4,00	4,00	4,50	5,00
24	Hornk. 0,5	0,00	0,00	2,00	2,00	3,00	4,00
	\bar{x}	1,13	1,50	3,00	3,00	3,88	4,88
	σ	0,65	0,87	0,71	0,71	0,54	0,54
25	Hornk. 1	1,00	1,50	3,00	3,00	3,00	3,50
26	Hornk. 1	0,00	1,00	3,00	3,00	4,00	7,00
27	Hornk. 1	1,00	1,50	3,00	3,00	4,00	6,00
28	Hornk. 1	1,00	1,50	4,00	4,00	4,00	5,00
	\bar{x}	0,75	1,38	3,25	3,25	3,75	5,38
	σ	0,43	0,22	0,43	0,43	0,43	1,29
29	Hornk. 2	1,50	2,00	3,50	3,50	4,50	7,00
30	Hornk. 2	0,00	1,00	3,00	4,00	4,00	5,00
31	Hornk. 2	1,00	1,50	3,50	3,50	4,50	6,00
32	Hornk. 2	0,00	0,50	3,00	3,00	4,00	5,00
	\bar{x}	0,63	1,25	3,25	3,50	4,25	5,75
	σ	0,65	0,56	0,25	0,35	0,25	0,83
33	Alginat 0,1	0,50	1,50	2,50	3,00	3,50	4,00

Nr.	Variante [M.-%]	14.08.2014	15.08.2014	19.08.2014	21.08.2014	29.08.2014	08.09.2014
34	Alginat 0,1	2,00	2,00	3,00	3,50	4,50	5,00
35	Alginat 0,1	1,50	2,00	3,50	3,50	4,00	4,00
36	Alginat 0,1	1,50	2,00	3,50	3,50	3,50	3,50
	\bar{x}	1,38	1,88	3,13	3,38	3,88	4,13
	σ	0,54	0,22	0,41	0,22	0,41	0,54
37	Alginat 0,5	2,00	2,00	2,50	3,00	3,50	3,50
38	Alginat 0,5	2,00	2,50	4,00	3,50	3,50	3,50
39	Alginat 0,5	2,00	2,00	3,50	3,50	3,50	3,50
40	Alginat 0,5	1,00	2,00	3,50	3,50	3,50	3,50
	\bar{x}	1,75	2,13	3,38	3,38	3,50	3,50
	σ	0,43	0,22	0,54	0,22	0,00	0,00
41	Alginat 1	0,00	0,50	1,50	1,50	1,50	0,00
42	Alginat 1	1,50	2,00	2,50	2,50	2,50	0,00
43	Alginat 1	1,00	1,50	2,50	2,50	2,50	0,00
44	Alginat 1	1,50	2,00	3,00	3,00	3,00	0,00
	\bar{x}	1,00	1,50	2,38	2,38	2,38	0,00
	σ	0,61	0,61	0,54	0,54	0,54	0,00
45	Alginat 2	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00
46	Alginat 2	0,00	0,00	1,50	1,50	1,50	0,00
47	Alginat 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00
48	Alginat 2	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00
	\bar{x}	0,00	0,00	0,63	0,63	0,75	0,00
	σ	0,00	0,00	0,54	0,54	0,43	0,00
49	Wp 0,1	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
50	Wp 0,1	0,00	0,00	1,50	1,50	3,00	3,50
51	Wp 0,1	0,00	1,00	3,00	3,00	3,50	4,00
52	Wp 0,1	1,50	2,00	3,50	3,50	4,00	4,00
	\bar{x}	0,75	1,25	2,63	2,75	3,63	4,13
	σ	0,75	0,83	0,74	0,75	0,41	0,54
53	Wp 0,5	0,00	0,00	1,50	2,00	3,50	5,00
54	Wp 0,5	2,00	2,00	2,00	3,00	4,00	5,00
55	Wp 0,5	1,00	2,00	4,00	4,00	6,50	8,00
56	Wp 0,5	2,00	2,50	4,00	4,00	5,00	6,00
	\bar{x}	1,25	1,63	2,88	3,25	4,75	6,00
	σ	0,83	0,96	1,14	0,83	1,15	1,22
57	Wp 1	1,50	2,00	4,00	4,00	8,00	12,00
58	Wp 1	1,50	2,00	2,50	3,00	5,00	10,00
59	Wp 1	1,50	1,50	3,00	3,50	7,00	10,00
60	Wp 1	1,50	2,00	3,50	3,50	4,50	9,00
	\bar{x}	1,50	1,88	3,25	3,50	6,13	10,25
	σ	0,00	0,22	0,56	0,35	1,43	1,09
61	Wp 2	0,00	0,50	2,50	3,00	4,50	9,00
62	Wp 2	2,00	2,00	3,00	3,00	4,50	10,00
63	Wp 2	2,00	2,00	3,50	3,50	5,00	9,00

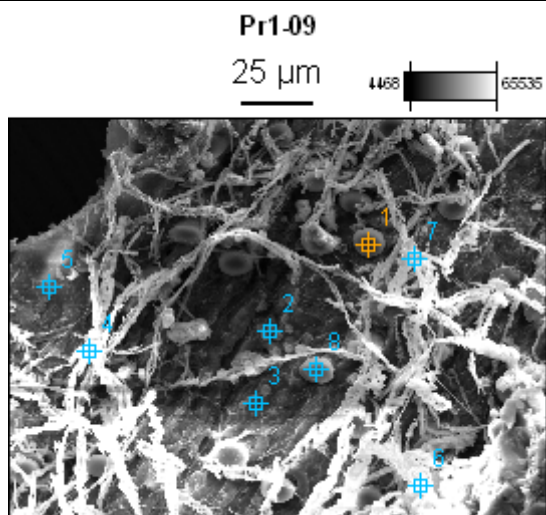
Nr.	Variante [M.-%]	14.08.2014	15.08.2014	19.08.2014	21.08.2014	29.08.2014	08.09.2014
64	Wp 2	0,00	0,50	2,50	3,00	4,00	8,00
	\bar{x}	1,00	1,25	2,88	3,13	4,50	9,00
	σ	1,00	0,75	0,41	0,22	0,35	0,71
65	Kontrolle	1,50	2,00	4,00	4,00	5,00	6,00
66	Kontrolle	0,00	0,00	2,50	2,50	4,00	5,00
67	Kontrolle	2,00	2,00	3,00	3,00	4,50	6,00
68	Kontrolle	2,00	2,00	4,00	4,00	6,00	6,50
	\bar{x}	1,38	1,50	3,38	3,38	4,88	5,88
	σ	0,82	0,87	0,65	0,65	0,74	0,54

Tab. A 4: Methodenübersicht der Bestimmung der chemischen Parameter für die Pflanzen-, Rohstoff- und Bodenproben

Parameter	Probenvorbereitung		Gerät	Methode
	Methode	Reagenz		
Pflanzen- und Rohstoffproben				
Mineralstoffgehalte P, K, Mg, Ca	Aufschluß Mikrowelle	Salpetersäure/ Wasser- stoffperoxid	ICP-OES	EN 13346 2000 Multielementanalyse
Schwermetalle Cu, Pb, Zn				
Spurenelemente Fe, Mn, Mo, B				
C/N, Rp aus N			vario Max	(LUFA Bd. III, 4.1.2)
Bodenproben (*auch bei den Rohstoffen angewendet)				
pH-Wert*	Extraktion	Calciumchlorid	pH-Meter	DIN 19684
Leitfähigkeit*			Konduktometer	LUFA Bd. I 10.1.1.
Trockenmasse*			Trockenschrank	LUFA Bd. III 3.1
C _{org}			vario C	DIN ISO 10694
C/			vario max	DIN ISO 10694
N _{min}	Extraktion	Calciumchlorid	CFA	LUFA Bd. I 6.1.3.1.
Mg _{CaCl2}	Extraktion	Calciumchlorid	AAS	LUFA Bd. I 6.2.4.1
K _{DL}	Extraktion	Ca-lactat (Doppel- lactat)	AAS	LUFA Bd. I 6.2.1.2
P _{DL}	Extraktion	Ca-lactat (Doppel- lactat)	CFA	LUFA Bd. I 6.2.1.2



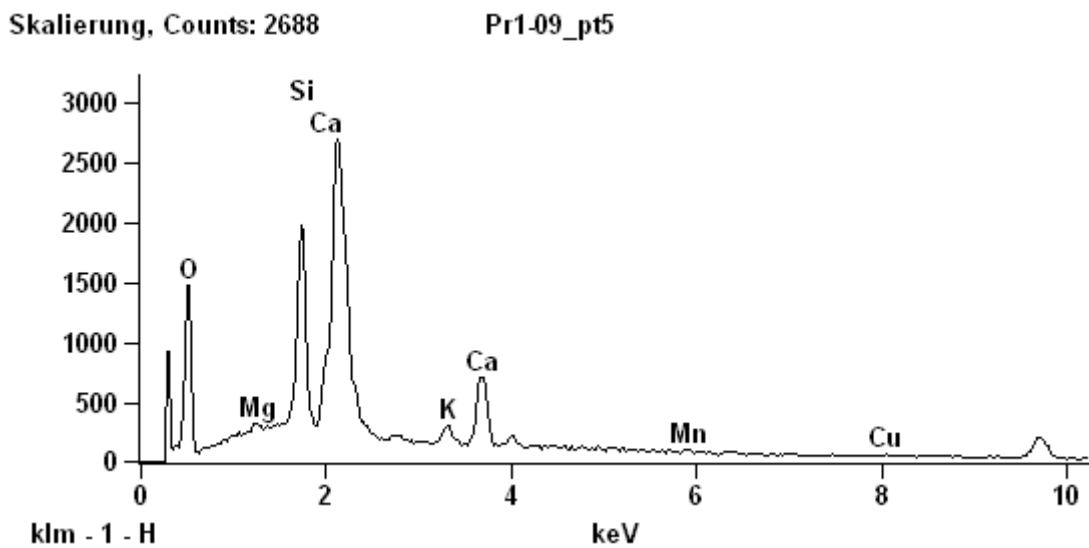
A 1: Oberboden (Ap-Horizont) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse



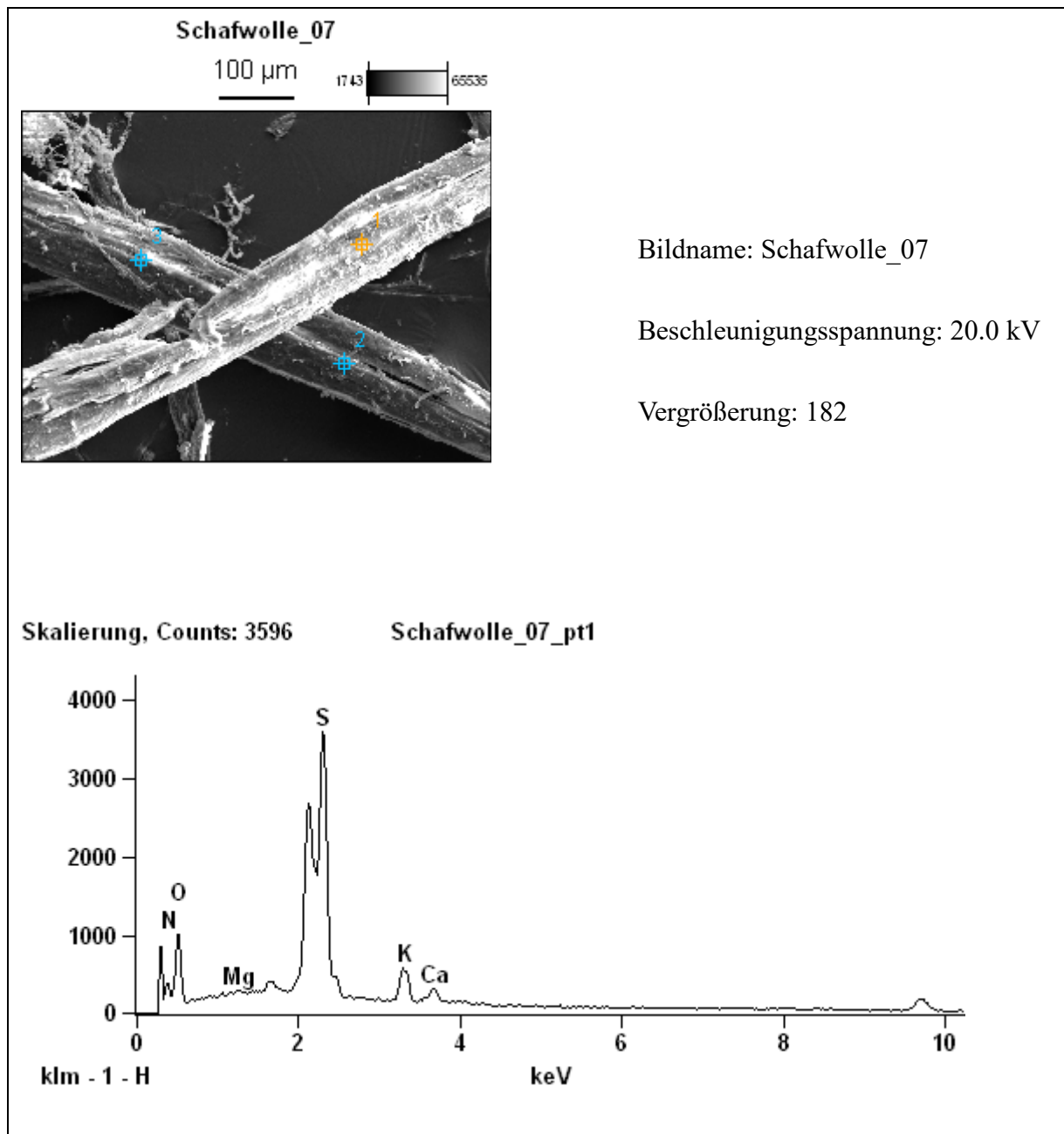
Bildname: Pr1-09

Beschleunigungsspannung:
20.0 kV

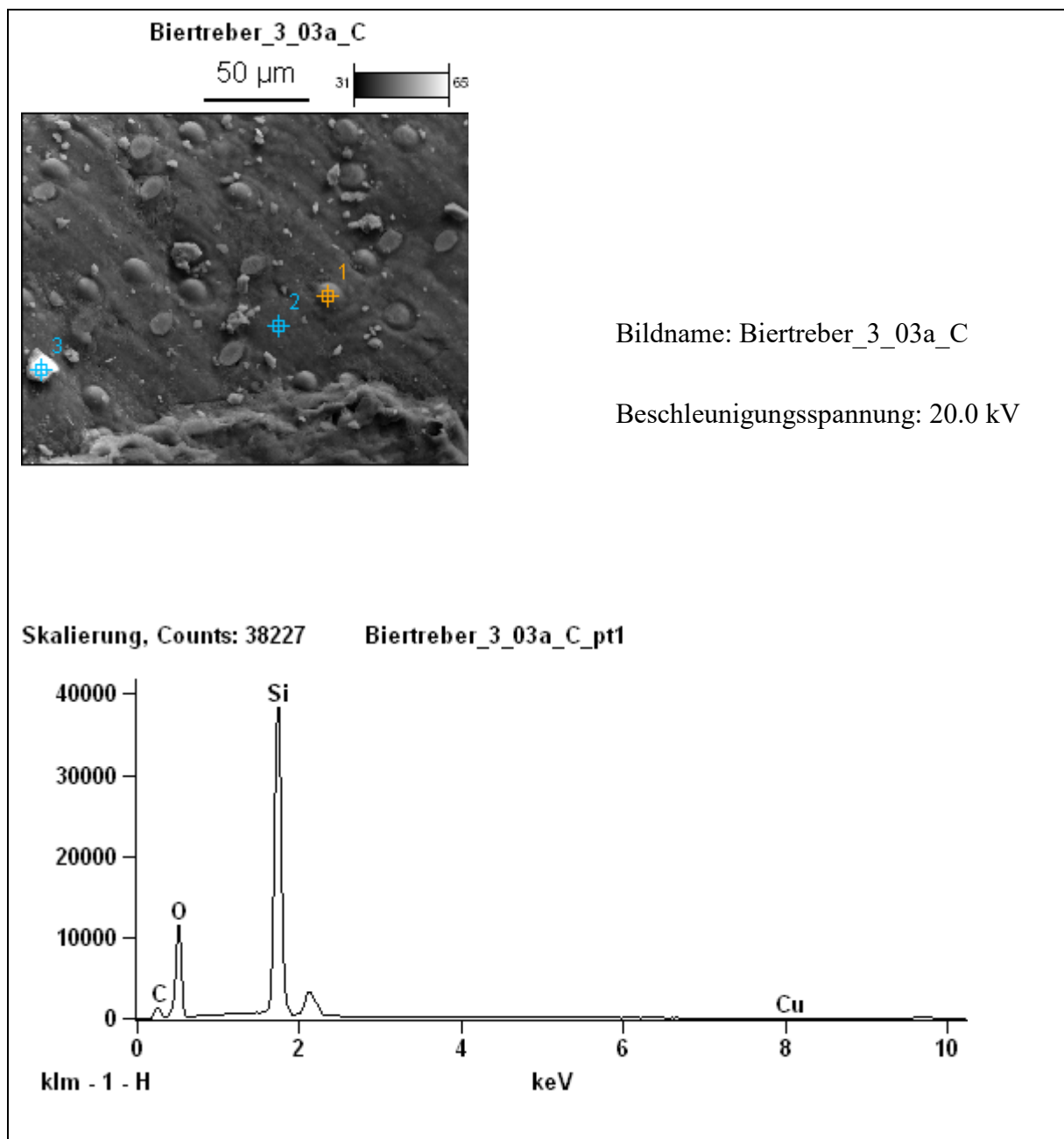
Vergrößerung: 606



A 2: Schafwollpellets (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse



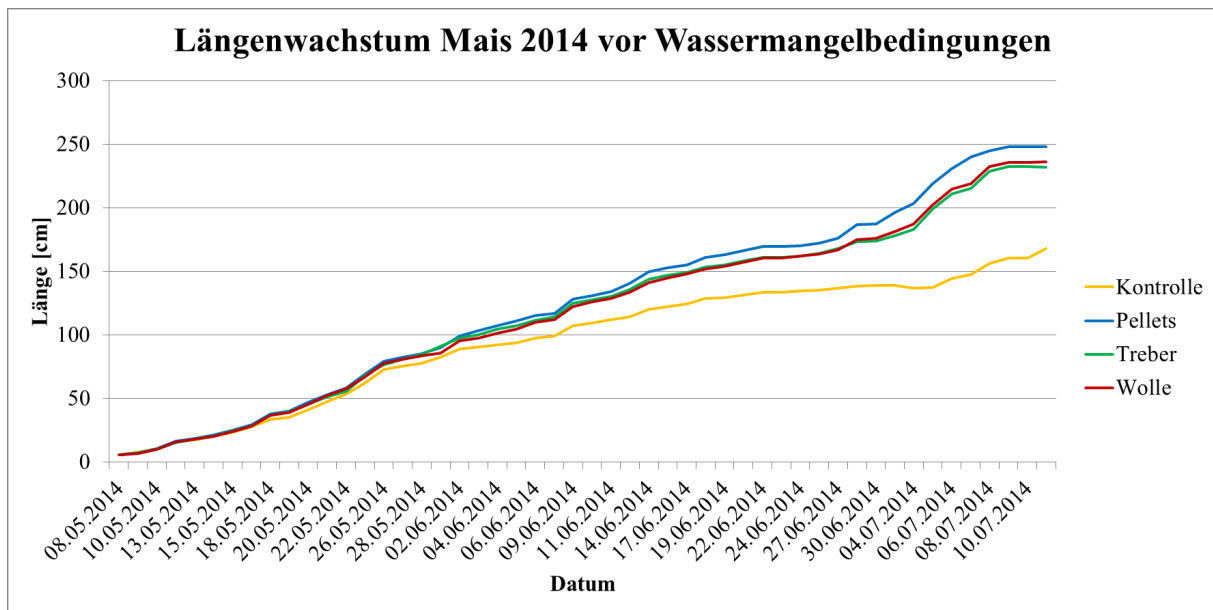
A 3: Rohwolle (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse



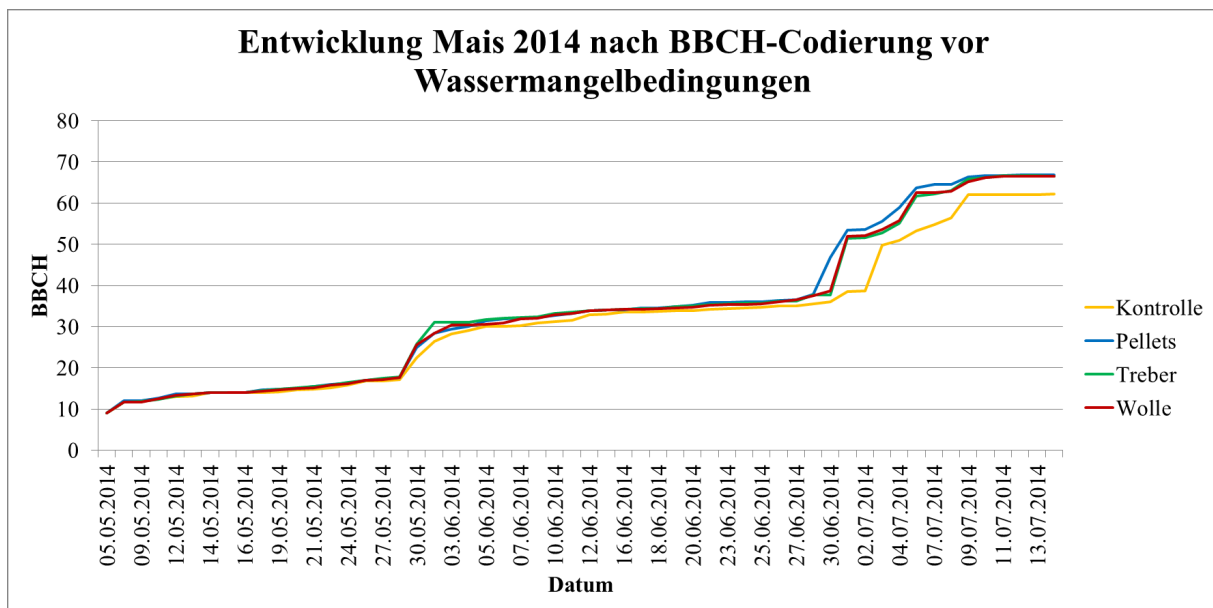
A 4: **Biertreber (nach neun Monaten im Boden) REM-Aufnahme mit Elementaranalyse**

Tab. A 5: Beginn und Ende der normalisierten Turgorwerte der Versuchsreihen 1 bis 3 im Gewächshaus (P=Schafwollpellets; W=Wolle; T=Biertreber; K=Kontrolle; D=NPK Dünger; b=bewässert, t=trocken)

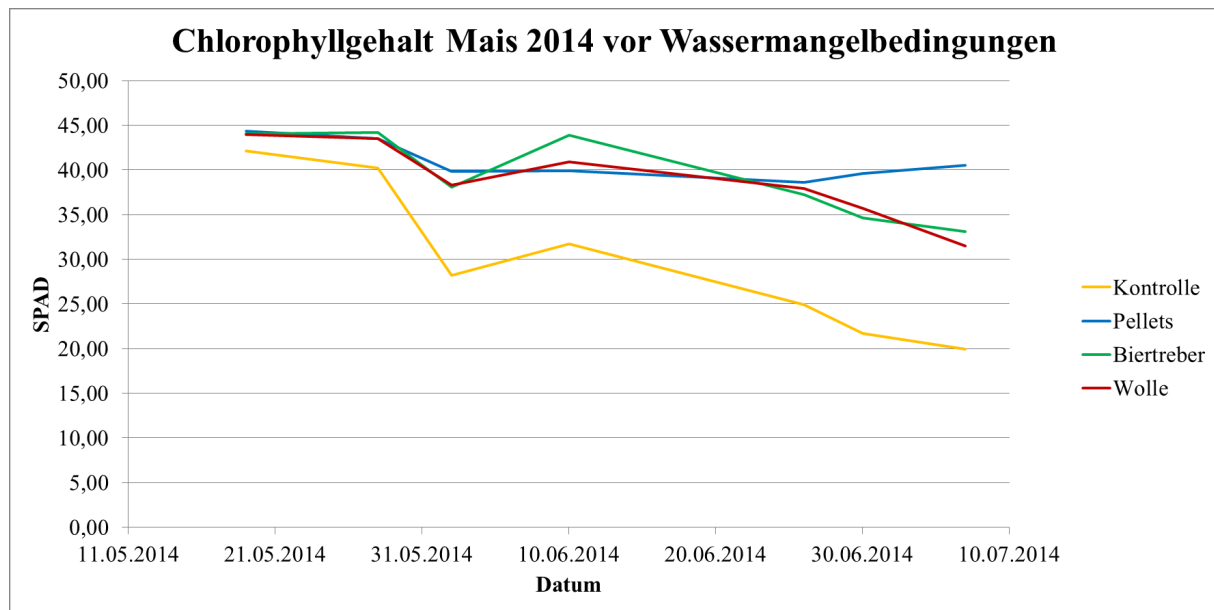
Versuchsreihe	ID	Versuchspflanze	Beginn der Messung	Ende der Messung
1	6	6 Pt	15.07.2014	07.08.2014
1	10	10 Pb	15.07.2014	19.08.2014
1	17	17 Tt	15.07.2014	18.08.2014
1	18	18 Tb	15.07.2014	19.08.2014
1	31	31 Kt	15.07.2014	19.08.2014
1	35	35 Kt	15.07.2014	10.08.2014
1	38	38 Kb	15.07.2014	17.08.2014
1	40	40 Kb	15.07.2014	12.08.2014
1	50	50 Wt	18.07.2014	03.08.2014
1	56	56 Wb	15.07.2014	12.08.2014
2	65	65 Kb	04.11.2014	09.12.2014
2	66	66 Kt	04.11.2014	24.11.2014
2	67	67 Kb	04.11.2014	09.12.2014
2	80	80 Wt	04.11.2014	09.12.2014
2	83	83 Wb	04.11.2014	09.12.2014
2	86	86 Wb	04.11.2014	09.12.2014
2	106	106 Pt	04.11.2014	09.12.2014
2	114	114 Pb	04.11.2014	09.12.2014
2	134	134 Tb	04.11.2014	09.12.2014
2	135	135 Tt	04.11.2014	09.12.2014
3	137	137 Db	22.06.2015	01.07.2015
3	140	140 Db	16.06.2015	01.07.2015
3	142	142 Dt	16.06.2015	01.07.2015
3	143	143 Dt	16.06.2015	01.07.2015
3	146	146 Wb	16.06.2015	01.07.2015
3	147	147 Wb	16.06.2015	01.07.2015
3	151	151 Wt	16.06.2015	01.07.2015
3	154	154 Wt	16.06.2015	01.07.2015
3	159	159 Tb	16.06.2015	22.06.2015
3	161	161 Tt	16.06.2015	01.07.2015
3	165	165 Tt	16.06.2015	22.06.2015
3	167	167 Kb	16.06.2015	22.06.2015
3	169	169 Kb	16.06.2015	01.07.2015
3	171	171 Kt	16.06.2015	01.07.2015
3	175	175 Kt	16.06.2015	25.06.2015



A 5: VR 1 Mais 2014 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=15)



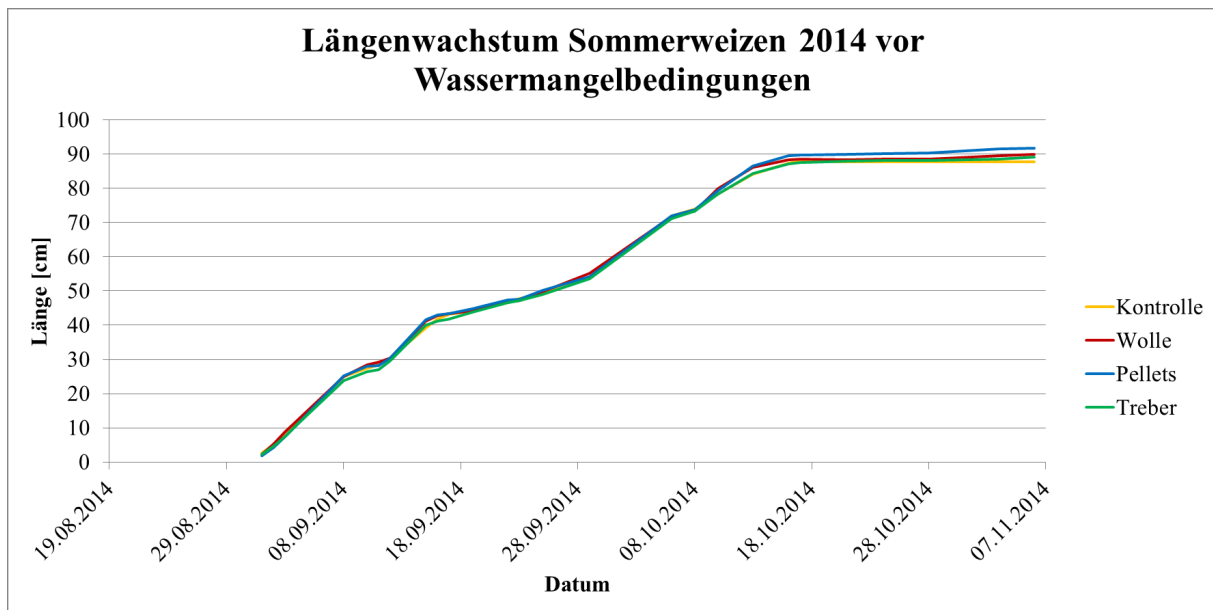
A 6: VR 1 Mais 2014 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=15)



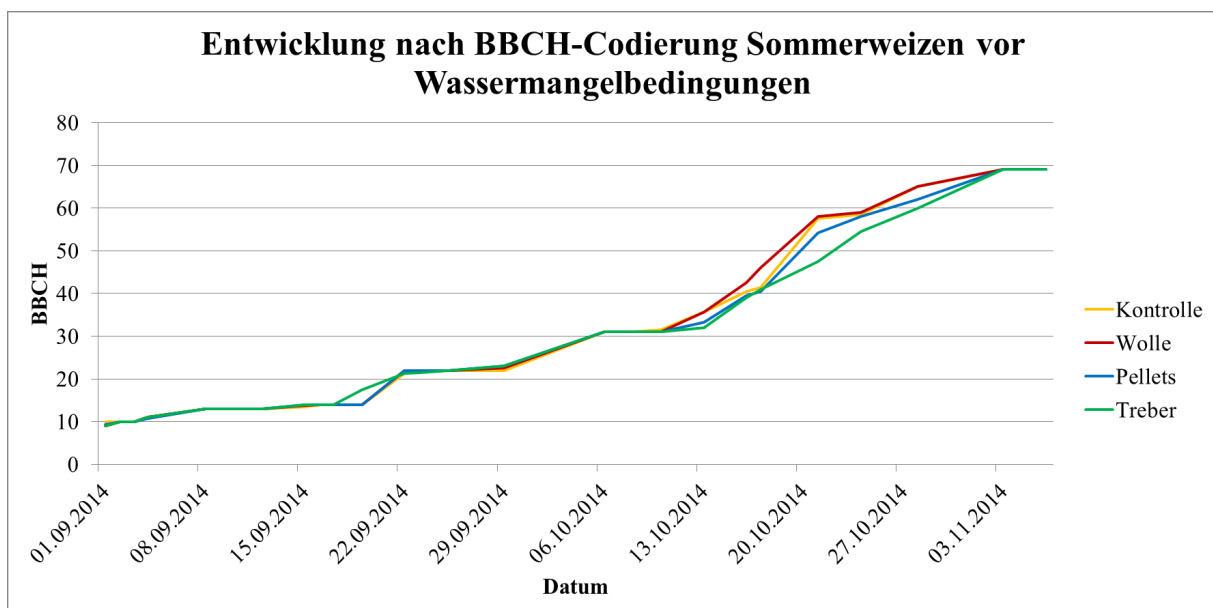
A 7: VR 1 Mais 2014 mittlerer Chlorophyllgehalt vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 15.07.2014; (n=150)

Tab. A 6: VR 1 Mais 2014 Korrelationskoeffizienten der normalisierten Turgorwerte und Bodenfeuchten sowie der normalisierten Turgorwerte und Lufttemperatur

Turgor - Bodenfeuchte		
Variante	Bewässerte Variante	Trockene Variante
Kontrolle	0,71	-0,81
Pellets	-0,73	-0,42
Wolle	0,86	-0,3
Treber	0,86	-0,07
Turgor - Lufttemperatur		
Variante	Bewässerte Variante	Trockene Variante
Kontrolle	0,65	0,01
Pellets	0,62	0,36
Wolle	-0,34	-0,13
Treber	-0,59	-0,14



A 8: VR 2 Sommerweizen 2014 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 06.11.2014; (n=15)



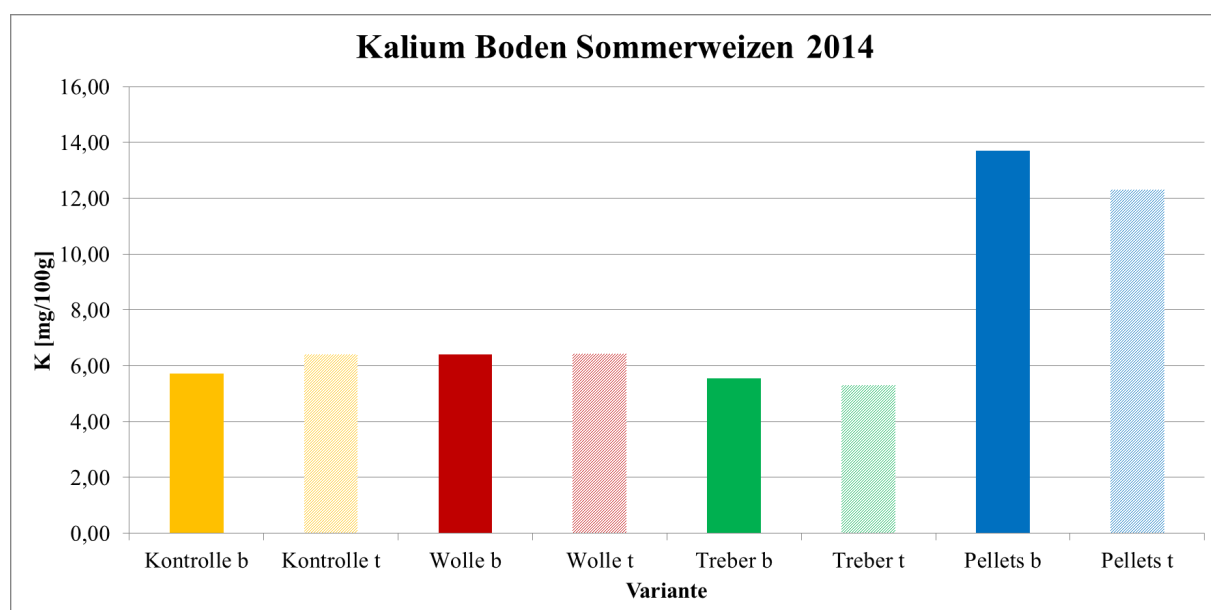
A 9: VR 2 Sommerweizen 2014 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 06.11.2014; (n=15)

Tab. A 7: VR 2 Sommerweizen 2014 chemische Analysen der Pflanzenmasse Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken)

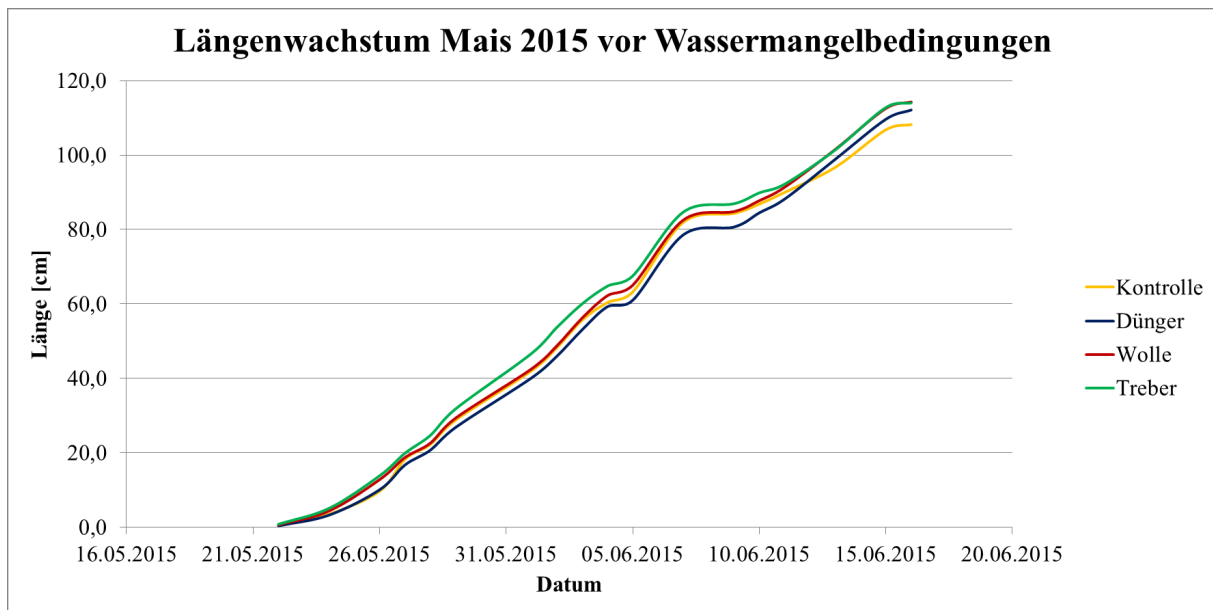
Probe	N _t	C _t	C/N	TS	Ca	K	Mg	P
	[%]	[%]		[%]	g kg ⁻¹ TM	g kg ⁻¹ TM	g kg ⁻¹ TM	g kg ⁻¹ TM
Kontrolle b	0,59	41,89	70,46	70,46	6,48	29,29	1,74	1,37
Kontrolle t	0,55	43,66	78,96	78,96	3,54	28,11	0,89	0,79
Wolle b	1,13	43,14	38,03	38,03	6,44	29,50	1,69	1,00
Wolle t	1,26	44,11	35,12	35,12	7,28	28,95	1,87	1,41
Treber b	0,99	43,53	44,16	44,16	7,40	29,32	2,20	1,37
Treber t	1,44	43,39	30,18	30,18	9,30	26,36	2,71	1,45
Pellets b	1,29	43,31	33,68	33,68	4,30	32,96	1,17	1,08
Pellets t	1,48	43,51	29,32	29,32	7,43	31,08	1,91	1,46

Tab. A 8: VR 2 Sommerweizen 2014 chemische Analysen der Pflanzsubstrate (Boden) im Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken)

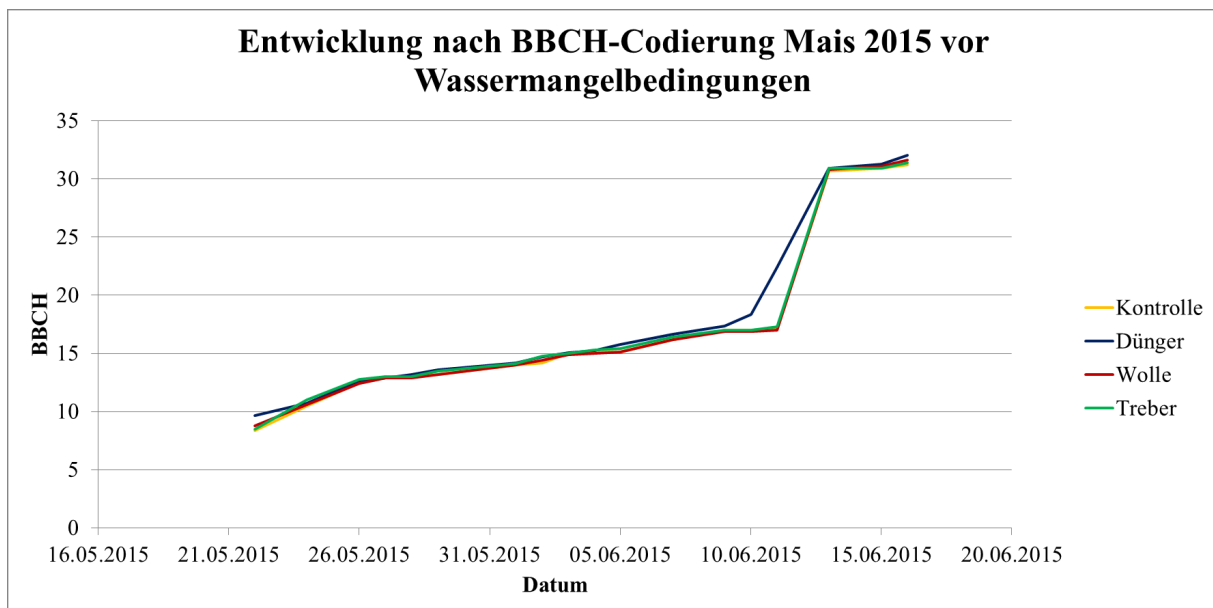
Probe	C/N	C _{org}	K _{DL}	P _{DL}
		[%]	[mg 100g ⁻¹]	[mg 100g ⁻¹]
Kontrolle b	11,95	1,13	5,73	31,93
Kontrolle t	12,44	1,16	6,42	31,91
Wolle b	11,41	1,22	6,39	30,93
Wolle t	11,71	1,19	6,44	30,85
Treber b	11,43	1,18	5,55	33,67
Treber t	11,96	1,23	5,30	33,81
Pellets b	11,02	1,17	13,70	33,03
Pellets t	11,11	1,18	12,31	32,40



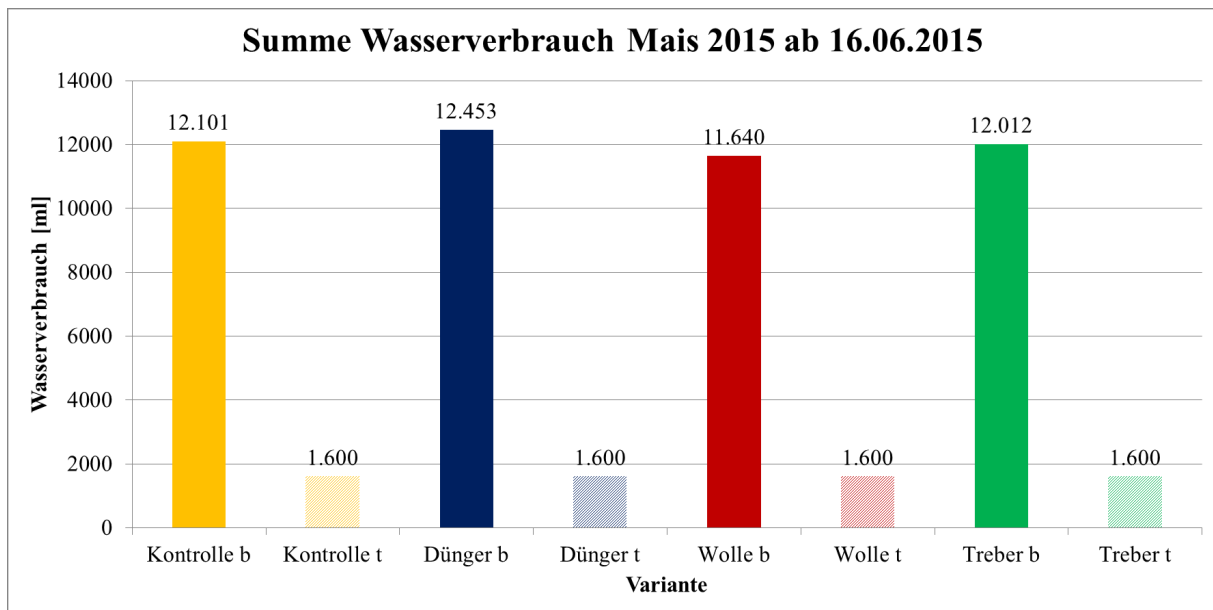
A 10: VR 2 Sommerweizen 2014 Kaliumgehalte [mg/100g] des Bodens nach der Ernte im Gewächshaus (b=bewässert, t=trocken; n=2)



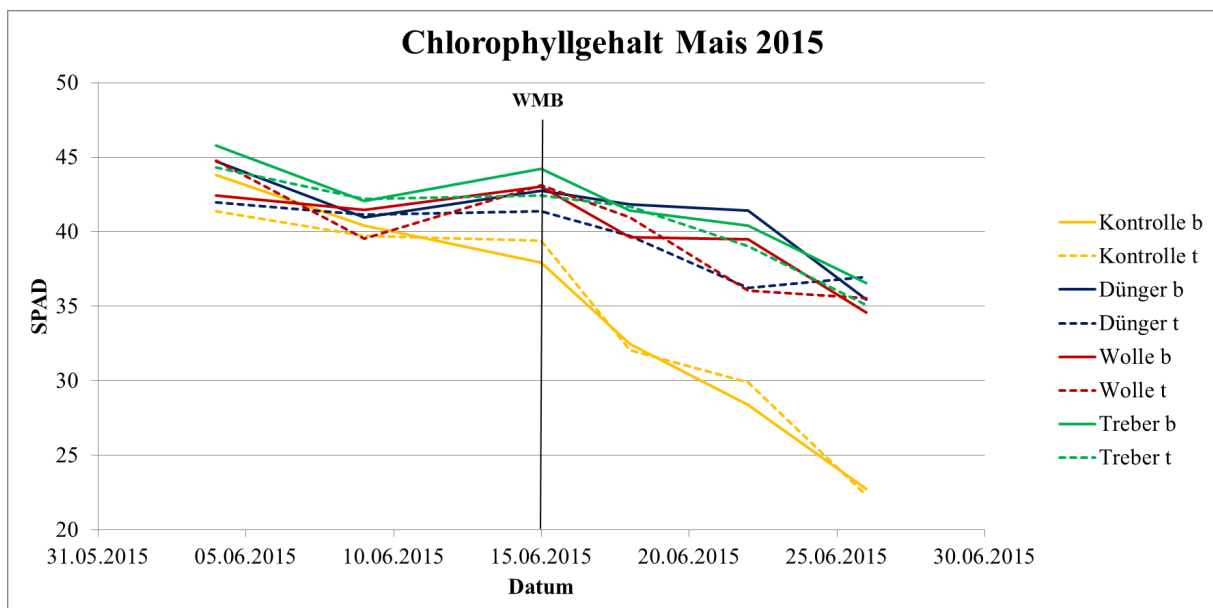
A 11: VR 3 Mais 2015 mittleres Längenwachstum vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (n=10)



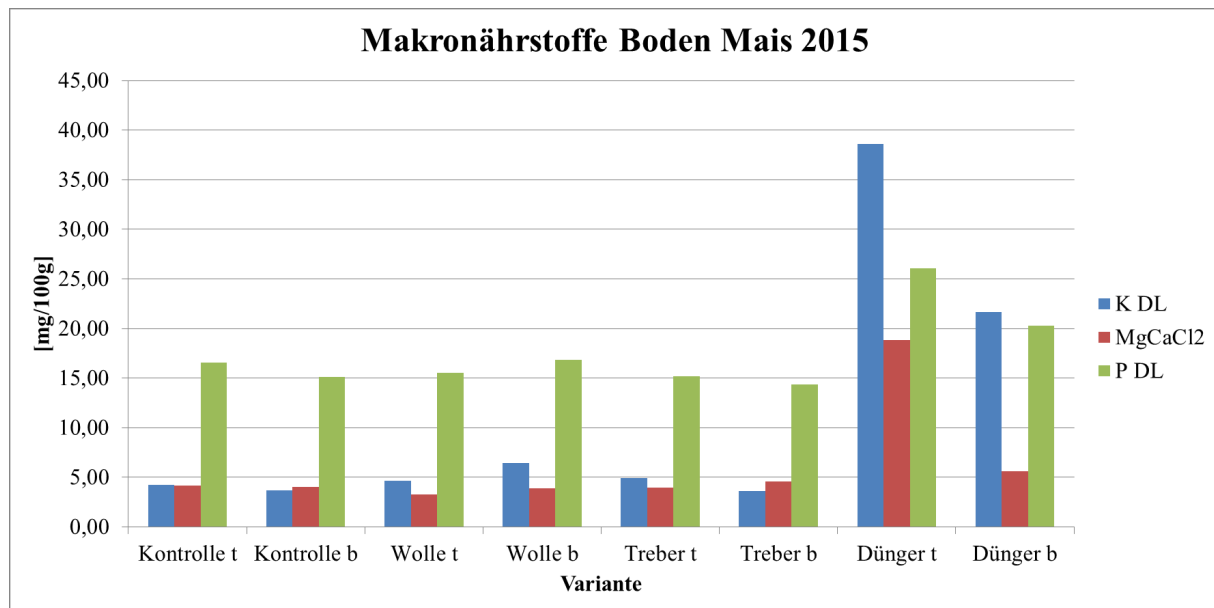
A 12: VR 3 Mais 2015 mittlere Entwicklung nach BBCH-Codierung vor Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (n=10)



A 13: VR 3 Mais 2015 Summe des mittleren Wasserverbrauchs der Versuchsvarianten ab Beginn der Wassermangelbedingungen am 16.06.2015; (b=bewässert, t=trocken; n=5)



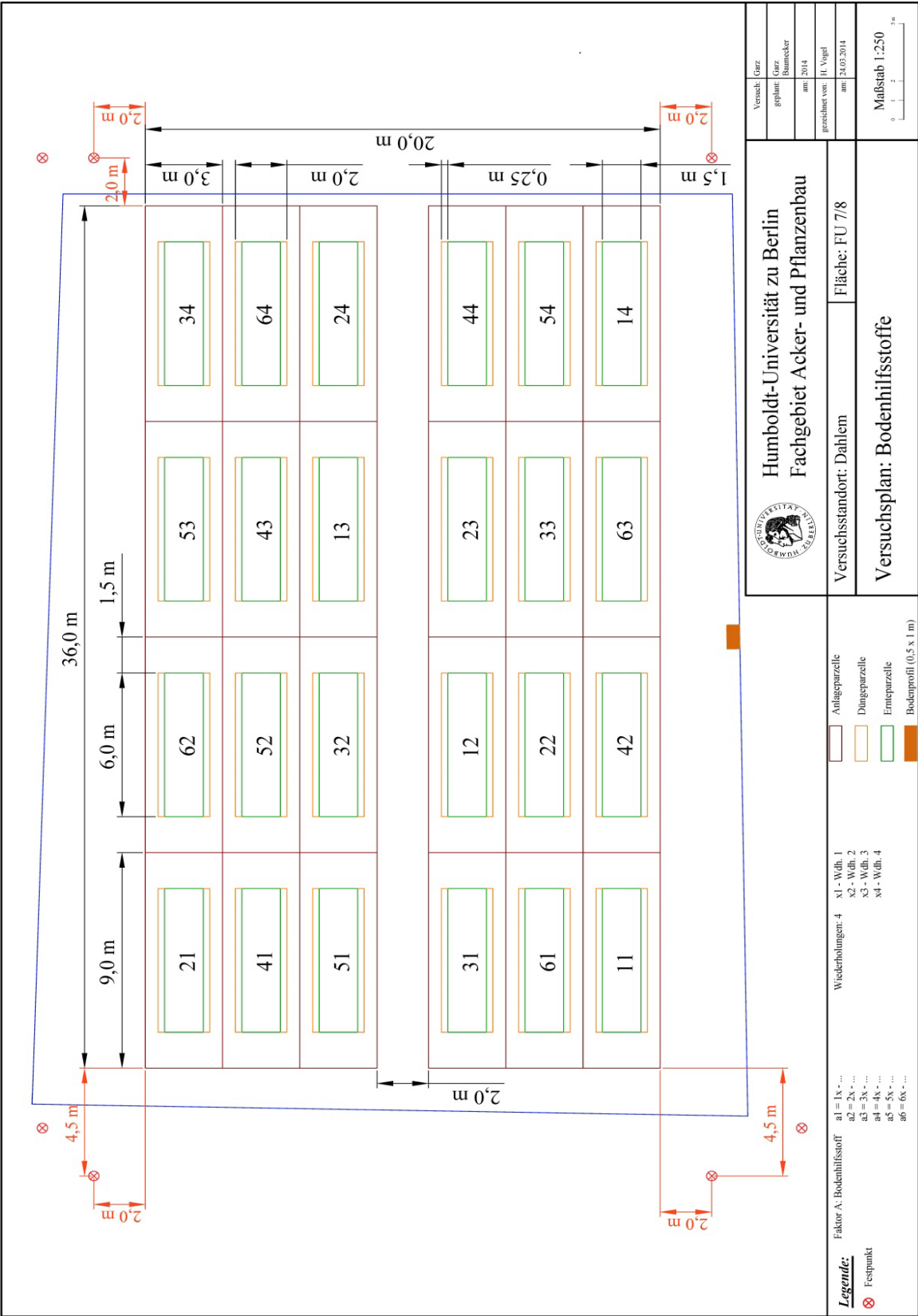
A 14: VR 3 Mais 2015 mittlerer Chlorophyllgehalt der Versuchsvarianten (b=bewässert, t=trocken; n= 50); WMB =Wassermangelbedingungen



A 15: VR 3 Mais 2015 Gehalte an Makronährstoffen im Boden (b= bewässert, t= trocken; n=2)

Tab. A 9: VR 3 Mais 2015 Nährstoffgehalte Stroh (b=bewässert, t=trocken; n=2)

Variante	N _t	C _t	C/N	Ca	K	Mg	P	TM
	[% TM]			[g kg ⁻¹ TM]				[%]
Kontrolle t	0,83	44,51	53,38	3,19	21,35	2,16	2,44	92,14
Kontrolle b	1,11	43,93	39,45	5,35	26,51	3,72	2,83	90,64
Wolle t	2,02	45,47	22,55	4,80	24,40	2,49	2,31	93,31
Wolle b	2,79	43,74	15,68	5,71	33,96	3,49	2,82	92,24
Treber t	1,79	45,32	25,38	4,57	20,59	3,06	2,44	92,51
Treber b	2,81	43,31	15,39	5,93	28,86	4,31	2,65	91,76
Dünger t	2,49	43,60	17,51	3,78	40,45	2,30	3,05	92,16
Dünger b	3,47	41,98	12,10	5,62	54,50	3,30	3,47	93,27



		Versuch: Garz geplant: Garz am: 2014 durchgeführt von: H. Vogel am: 24.03.2014	
Humboldt-Universität zu Berlin Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau		Versuchsstandort: Dahlem Fläche: FU 7/8	
Versuchsplan: Bodenhilfsstoffe		Maßstab 1:250 0 1 2 3 m	

A 16: Versuchsplan der Freilandversuchsfläche FU 7/8 am Standort Berlin-Dahlem

Tab. A 10: VP 1 Sommerweizen 2014 Entwicklung nach BBCH-Codierung, MW (SD=0 bis 1,66; n=4)

Datum	Kontrolle	Rohwolle 0,1 M.-%	Schafwollpellets 0,5 M.-%	Biertreber 0,5 M.-%
08.04.2014	9	9	9	9
09.04.2014	9	9	9	9
10.04.2014	10	10	10	10
11.04.2014	11	11	11	11
13.04.2014	11	11	11	11
14.04.2014	11	11	11	11
15.04.2014	11	11	11	11
16.04.2014	11	11	11	11
17.04.2014	11	11	11	11
22.04.2014	12	12	12	12
24.04.2014	12	12	12	12
25.04.2014	13	13	13	13
28.04.2014	21	21	21	21
30.04.2014	22	22	22	22
02.05.2014	23	23	23	23
05.05.2014	23	23	23,5	23
07.05.2014	23	24	24	24
09.05.2014	24	24,5	24	24,5
10.05.2014	24	26	25	26
12.05.2014	28	29	28,5	29
14.05.2014	29	30	29,5	30
19.05.2014	30	30,5	30,5	31
21.05.2014	30,5	31	31	31
24.05.2014	30,5	31	31,5	31,5
26.05.2014	31,5	32	33	32,5
30.05.2014	41	43	45	43
01.06.2014	44	47	47	47
02.06.2014	50	51	51	51
03.06.2014	51	51	51,5	51,5
04.06.2014	51	52	52,5	52
05.06.2014	52,5	53,5	54	53,5
06.06.2014	54,5	57	59	57
07.06.2014	57,5	59	59	59
08.06.2014	60	59	61	60
09.06.2014	61	61	61	61
10.06.2014	61	61	61	61
12.06.2014	65	65	65	65
13.06.2014	69	69	69	69
14.06.2014	69	69	69	69
15.06.2014	69	69	69	69
16.06.2014	69	69	69	69
19.06.2014	71	71	71	71

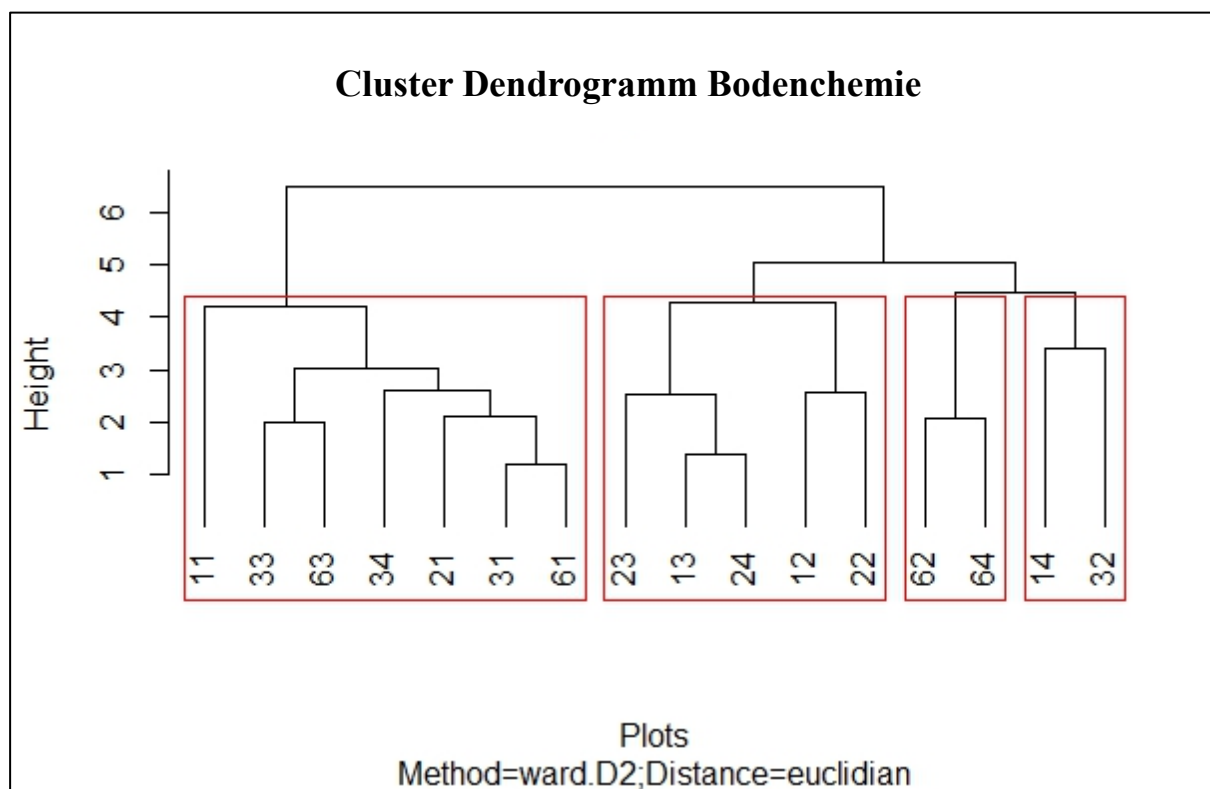
Datum	Kontrolle	Rohwolle 0,1 M.-%	Schafwollpellets 0,5 M.-%	Biertreber 0,5 M.-%
20.06.2014	71	71	71	71
22.06.2014	71	71	72	72
23.06.2014	72	71	72	72
24.06.2014	73	73	73	73
26.06.2014	73	73	73	73
27.06.2014	73	73	73	73
28.06.2014	73	74	75	75
29.06.2014	73	74	75	75
30.06.2014	75	75	75	76
02.07.2014	75	77	77	77
03.07.2014	85	85	85	85
04.07.2014	85	85	85	85
05.07.2014	85	85	85	85
06.07.2014	85	85	85	85
07.07.2014	85	85	85	85
08.07.2014	85	85	85	85
09.07.2014	85	85	85	85
10.07.2014	85	85	85	85
11.07.2014	85	85	85	85
12.07.2014	85	85	85	85
13.07.2014	85	85	85	85
14.07.2014	85	85	85	85
15.07.2014	85	85	85	85
16.07.2014	87	85	85	87
17.07.2014	87	86	87	87
18.07.2014	87	87	87	87
20.07.2014	87	87	87	88
21.07.2014	87	88	89	89
23.07.2014	92	92	92	92
25.07.2014	93	93	93	93
26.07.2014	93	93	93	93
28.07.2014	97	97	97	97
29.07.2014	97	97	97	97
30.07.2014	99	99	99	99
31.07.2014	99	99	99	99
01.08.2014	99	99	99	99

Tab. A 11: VP 1 Sommerweizen 2014 Ernteparameter der Freilandversuche (rot=aus Meterenden abgeleitet)

Plot/ Vari- ante	FM Stroh [kg]	Äh- ren/ m ²	Kör- ner/ Ähre	FM Körner [kg]	Ertrag [dt ha ⁻¹]	TKG [g]	TS Stroh [%]	Kornsiebung g von 100 g Körnern in mm					
								3	2,8	2,5	2	2	<2
Plot 11	8,00	323	32	4,68	52,04	43,25	65,00	23,9	34,6	30,4	9,2	1,4	0,5
Plot 12		278	36		59,95	44,47		27,5	34,4	27,8	8,6	1,1	0,5
Plot 13	6,33	265	34	4,27	47,39	44,47	66,00	23,1	34,1	31,4	9,8	1,1	0,6
Plot 14	6,11	238	33	4,34	48,22	43,67	68,42	21,1	33,5	31,8	13	1,9	0,7
Plot 21	5,46	238	33	4,02	44,65	45,22	68,63	28,7	34,1	28,5	7,3	0,8	0,7
Plot 22	6,58	218	36	4,48	49,80	41,66	68,29	21,0	35,7	31,8	9,4	1,7	0,6
Plot 23	6,90	240	38	4,34	48,22	40,95	64,81	22,1	34,0	31,6	9,7	1,9	0,6
Plot 24	5,85	233	30	3,91	43,49	41,26	69,84	18,4	33,7	32,6	13	1,9	0,9
Plot 31		290	34		58,64	44,57		29,9	35,4	26,4	7,1	0,8	0,4
Plot 32	6,88	310	31	4,85	53,92	42,52	65,00	25,7	35,5	28,4	8,7	1,1	0,6
Plot 33	7,32	307	31	4,62	51,29	42,99	63,04	23,6	33,8	31,4	9,2	1,4	0,5
Plot 34	5,45	255	33	3,58	39,80	43,22	72,97	19,6	34,9	33,3	10	1,3	0,5
Plot 61	3,65	245	30	4,00	44,45	41,16	68,00	30,9	34,4	26,3	6,6	1,3	0,6
Plot 62	4,70	242	34	3,74	41,56	43,43	74,36	29,7	37,7	24,8	6,5	0,9	0,5
Plot 63	5,48	267	29	3,43	38,10	41,25	57,89	35,1	34,9	22,7	5,9	1,2	0,4
Plot 64	4,50	263	33	3,43	38,06	41,50	76,60	26,5	36,2	26,7	8,6	1,5	0,7
Variante [M.-%] MW													
Pellets 0,5 %	6,81	276	34	4,43	51,90	43,97	66,47	23,9	34,2	30,4	9,7	1,4	0,6
Treber 0,5 %	6,20	233	34	4,19	46,54	42,27	67,89	22,6	34,4	31,1	9,7	1,6	0,7
Wolle 0,1 %	6,55	290	32	4,35	50,91	43,33	67,01	24,7	34,9	29,9	8,9	1,2	0,5
Kon- trolle	4,59	254	31	3,65	40,54	41,84	69,21	30,5	35,8	25,1	6,9	1,2	0,5
Variante [M.-%] SD													
Pellets 0,5 %	0,84	31	2	0,18	4,97	0,53	1,44	2,3	0,4	1,6	0,9	0,3	0,1
Treber 0,5 %	0,57	9	3	0,23	2,57	1,72	1,87	3,8	0,8	1,6	1,9	0,4	0,1
Wolle 0,1 %	0,80	22	1	0,55	6,93	0,76	4,29	3,7	0,7	2,7	1,2	0,3	0,0
Kon- trolle	0,65	11	2	0,24	2,67	0,93	7,26	3,1	1,3	1,6	1,0	0,2	0,1

Tab. A 12: VP 1 Sommerweizen 2014 Eingangsparameter der Clusteranalysen

Ernte	Bodenphysik/Bodenatmung	Bodenchemie
Länge [cm]	Substanzvolumen	C/N
SPAD	Gesamtporenvolumen	C _{org}
Ertrag [dt ha ⁻¹]	Weite Grobporen	K _{DL}
TKG [g]	Enge Grobporen	P _{DL}
Ähren [m ²]	Mittelporen	Mg _{CaCl2}
Korn TS	Feinporen	pH-Wert
Korn C/N	Luftkapazität	
Korn Rp	Nutzbare Feldkapazität	
	Feldkapazität	
	Trockenrohdichte	
	Bodenatmung	



A 17: VP 1 Sommerweizen 2014 Dendrogramm der bodenchemischen Parameter

Tab. A 13: VP 2 Winterweizen 2015 Entwicklung nach BBCH-Codierung, MW (SD=0 bis 3,5; n=4)

Datum	Wolle 0,2 M.-% (2015)	Wolle 0,1 M.-% (2015)	Wolle 0,1 M.-% (2014)	Pellets 0,5 M.-% (2014)	Treber 0,5 M.-% (2014)	Kontrolle
14.10.2014	9	9	9	9	9	9
17.10.2014	10	10	10	10	10	10
20.03.2015	23	23	23	23	23	23
02.04.2015	26	28	25	27	26	24
07.04.2015	28	29	27	28	27	25
16.04.2015	29	30	28	29	29	27
23.04.2015	31	32	31	31	31	30
04.05.2015	33	33	33	33	33	32
07.05.2015	33	34	33	33	33	33
11.05.2015	34	34	34	34	34	34
13.05.2015	34	35	34	34	34	34
18.05.2015	39	39	39	39	39	39
21.05.2015	49	44	45	46	45	45
27.05.2015	58	58	58	58	58	57
29.05.2015	59	58	58	59	58	59
02.06.2015	59	59	59	59	59	59
05.06.2015	65	65	65	65	65	65
08.06.2015	69	69	69	69	69	69
17.06.2015	73	73	72	72	73	73
22.06.2015	76	76	76	76	76	75
30.06.2015	80	79	83	79	83	83
06.07.2015	83	82	84	83	84	85
10.07.2015	86	85	86	86	87	87
16.07.2015	89	88	89	89	89	89
20.07.2015	89	89	91	91	92	92
23.07.2015	92	92	93	93	93	93
27.07.2015	99	99	99	99	99	99
30.07.2015	99	99	99	99	99	99

Tab. A 14: VP 2 Winterweizen 2015 Ernteparameter der Freilandversuche

Plot	FM Stroh [kg]	FM Kör- ner [kg]	Ertrag [dt ha ⁻¹]	TKG [g]	TS Stroh [%]	Kornsiebung g von 100 g Körnern in mm					
						3	2,8	2,5	2	2	0
Plot 11	4,45	3,92	43,56	45,85	86,45	34,2	36,1	22,1	5,8	1,1	0,9
Plot 12	5,52	5,08	56,42	44,13	83,66	27,3	37,6	26,2	6,9	1,4	0,6
Plot 13	2,98	2,55	28,38	45,22	82,60	41,3	33,4	17,6	5,4	1,3	1,0
Plot 14	3,46	3,18	35,33	43,46	86,09	34,4	33,7	22,5	7,3	1,3	0,9
Plot 21	2,09	2,18	24,24	48,53	85,32	50,3	34,3	10,4	3,0	1,0	1,1
Plot 22	4,48	4,23	47,02	46,98	81,54	39,2	37,2	16,5	4,9	1,4	0,9
Plot 23	3,56	3,48	38,71	44,78	82,84	32,0	39,3	21,8	5,3	1,1	0,9
Plot 24	2,82	2,55	28,38	42,77	85,67	36,0	34,2	20,2	6,7	1,3	1,6

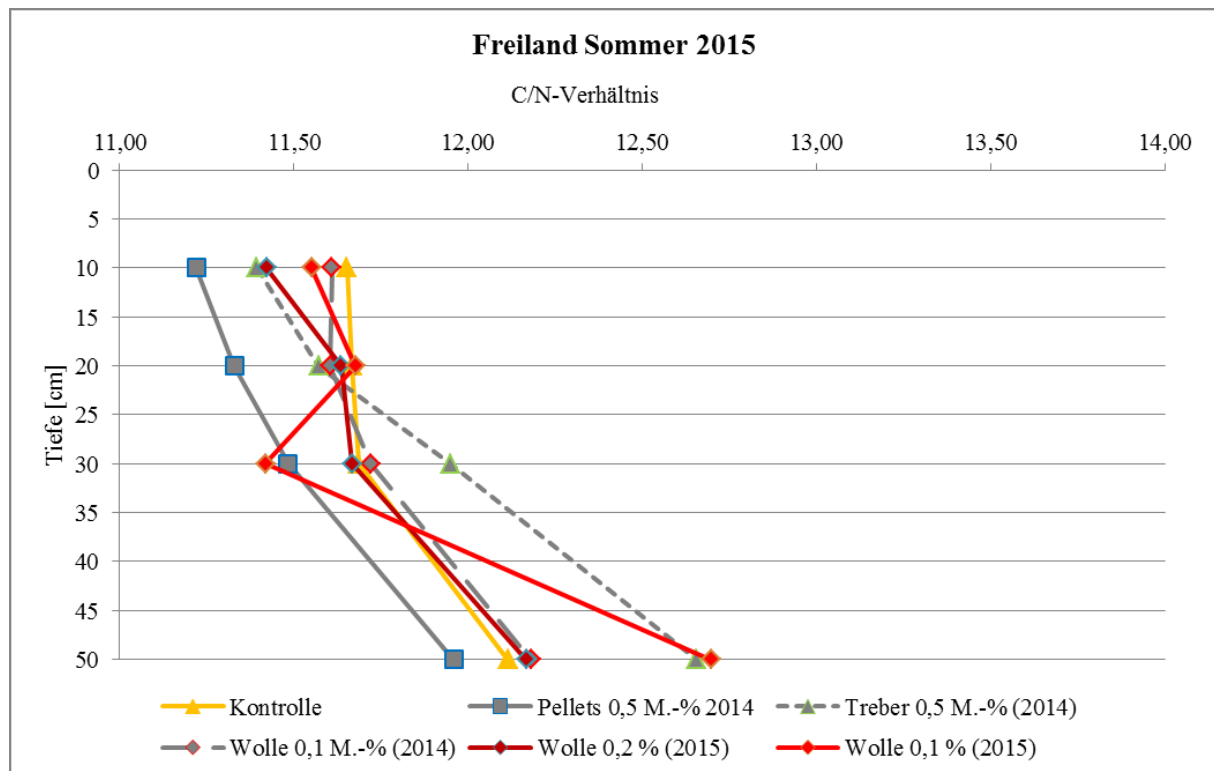
Plot	FM Stroh [kg]	FM Körner [kg]	Ertrag [dt ha ⁻¹]	TKG [g]	TS Stroh [%]	Kornsiebung g von 100 g Körnern in mm					
						3	2,8	2,5	2	2	0
Plot 31	4,52	4,23	47,00	46,72	81,21	36,3	39,2	18,0	4,1	1,2	1,1
Plot 32	4,45	4,11	45,69	47,08	82,67	33,6	38,9	20,9	4,6	1,0	1,1
Plot 33	3,93	3,55	39,42	43,55	84,56	30,3	39,8	21,9	5,8	1,1	1,0
Plot 34	3,09	1,69	18,78	42,88	85,91	35,9	35,9	19,3	5,1	1,8	1,9
Plot 41	5,09	5,04	55,98	44,79	84,71	28,7	40,0	22,5	6,1	1,5	1,2
Plot 42	4,12	3,95	43,93	46,5	81,37	38,7	38,0	17,1	4,0	0,9	1,2
Plot 43	3,89	2,84	31,60	45,08	86,20	38,6	38,1	16,5	4,8	1,2	0,9
Plot 44	4,12	3,85	42,73	42,3	86,16	30,1	37,8	22,4	6,8	1,5	1,4
Plot 51	6,07	5,73	63,64	42,9	85,96	18,9	39,7	30,0	9,1	1,2	1,0
Plot 52	3,91	3,98	44,20	44,15	85,64	32,3	37,6	21,3	5,8	1,3	1,8
Plot 53	4,62	4,20	46,71	43,57	84,89	31,2	35,8	22,9	7,2	1,4	1,5
Plot 54	7,59	6,54	72,67	43,49	80,72	21,3	42,5	27,4	6,5	1,2	1,2
Plot 61	3,08	2,37	26,33	43,21	82,50	36,3	33,2	19,8	7,5	1,8	1,4
Plot 62	2,22	2,07	22,98	45,27	84,84	48,0	35,5	11,3	2,8	1,0	1,4
Plot 63	3,82	3,54	39,29	49,04	73,55	49,9	32,5	12,4	3,6	1,2	0,4
Plot 64	2,41	1,97	21,91	43,62	83,54	35,7	38,3	17,9	4,8	1,4	1,9
Variante [M.-%] MW											
Pellets 0,5 (2014)	4,10	3,68	40,92	44,67	84,70	34,3	35,2	22,1	6,3	1,3	0,8
Treber 0,5 (2014)	3,24	3,11	34,59	45,77	83,84	39,4	36,2	17,2	4,9	1,2	1,1
Wolle 0,1 (2014)	4,00	3,40	37,72	45,06	83,59	34,0	38,5	20,0	4,9	1,3	1,3
Wolle 0,2 (2015)	4,31	3,92	43,56	44,67	84,61	34,1	38,5	19,6	5,4	1,3	1,2
Wolle 0,1 (2015)	5,55	5,11	56,81	43,53	84,30	25,9	38,9	25,4	7,2	1,3	1,4
Kontrolle	2,88	2,49	27,63	45,29	81,11	42,5	34,9	15,4	4,7	1,3	1,3
Variante [M.-%] SD											
Pellets 0,5 (2014)	0,98	0,94	10,44	0,93	1,62	5,0	1,7	3,1	0,8	0,1	0,1
Treber 0,5 (2014)	0,89	0,80	8,90	2,18	1,72	6,8	2,1	4,4	1,3	0,2	0,3
Wolle 0,1 (2014)	0,57	1,02	11,31	1,86	1,79	2,4	1,5	1,5	0,6	0,3	0,4
Wolle 0,2 (2015)	0,46	0,78	8,63	1,51	1,96	4,6	0,9	2,8	1,1	0,2	0,2
Wolle 0,1 (2015)	1,41	1,06	11,82	0,44	2,10	5,9	2,5	3,5	1,2	0,1	0,3
Kontrolle	0,63	0,62	6,93	2,30	4,44	6,5	2,3	3,6	1,8	0,3	0,5

Tab. A 15: VP 2 Winterweizen 2015 chemische Analysen Korn; n=2

Plot/Variante	N _t	C _t	Rp	C/N	Ca	K	Mg	P
	[% TM]				[g kg ⁻¹ TM]			
11	2,25	45,61	12,81	20,30	0,36	4,57	1,09	3,53
12	2,16	45,88	12,33	21,21	0,38	4,82	1,17	3,77
13	1,78	45,61	10,17		0,40	5,10	1,17	3,80
14	2,03	45,60	11,58	22,45	0,37	4,87	1,06	3,55
21	1,72	45,45	9,78	26,47	0,43	4,82	1,30	4,03
22	1,71	45,59	9,77	26,61	0,35	4,83	1,13	3,48
23	1,81	45,60	10,32	25,18	0,33	4,75	1,07	3,47
24	1,79	45,77	10,17	25,64	0,38	5,08	1,13	3,72
31	1,72	45,63	9,81	26,51	0,35	4,83	1,18	3,55
32	1,85	45,77	10,53	24,78	0,35	5,01	1,17	3,72
33	1,72	45,56	9,79	26,53	0,35	5,19	1,18	3,78
34	1,79	45,88	10,21	25,61	0,42	5,13	1,29	4,11
41	1,91	45,75	10,89	23,95	0,36	4,75	1,16	3,57
42	1,88	45,68	10,73	24,27	0,38	4,83	1,28	3,80
43	1,87	45,74	10,68	24,41	0,39	4,85	1,27	3,89
44	1,86	45,64	10,61	24,53	0,35	4,75	1,06	3,50
51	2,29	45,91	13,04	20,06	0,38	4,43	1,08	3,49
52	2,22	45,78	12,63	20,66	0,40	4,66	1,28	3,90
53	2,39	46,01	13,61	19,27	0,43	4,66	1,29	3,84
54	2,32	45,82	13,25	19,71	0,41	4,56	1,16	3,78
61	1,64	45,68	9,33	27,91	0,38	5,20	1,13	3,76
62	1,70	45,62	9,71	26,78	0,44	4,84	1,36	4,14
63	1,63	45,46	9,26	27,97	0,38	4,76	1,21	3,79
64	1,82	45,49	10,37	25,00	0,38	4,89	1,24	3,92
Variante [M.-%] MW								
Pellets 0,5 (2014)	2,06	45,68	11,72	21,32	0,38	4,84	1,12	3,66
Treber 0,5 (2014)	1,76	45,60	10,01	25,98	0,37	4,87	1,16	3,68
Wolle 0,1 (2014)	1,77	45,71	10,08	25,86	0,37	5,04	1,21	3,79
Wolle 0,2 (2015)	1,88	45,71	10,73	24,29	0,37	4,79	1,19	3,69
Wolle 0,1 (2015)	2,30	45,88	13,13	19,93	0,41	4,58	1,20	3,75
Kontrolle	1,70	45,56	9,67	26,92	0,40	4,92	1,23	3,90
Variante [M.-%] SD								
Pellets 0,5 (2014)	0,17	0,12	1,00	0,88	0,01	0,19	0,05	0,12
Treber 0,5 (2014)	0,04	0,12	0,24	0,59	0,04	0,13	0,09	0,23
Wolle 0,1 (2014)	0,05	0,12	0,31	0,73	0,03	0,14	0,05	0,20
Wolle 0,2 (2015)	0,02	0,05	0,10	0,21	0,02	0,04	0,09	0,16
Wolle 0,1 (2015)	0,06	0,09	0,35	0,51	0,02	0,09	0,09	0,16
Kontrolle	0,08	0,09	0,44	1,21	0,03	0,17	0,08	0,15

Tab. A 16: VP 2 Winterweizen 2015 bodenchemische Kennwerte; n=2

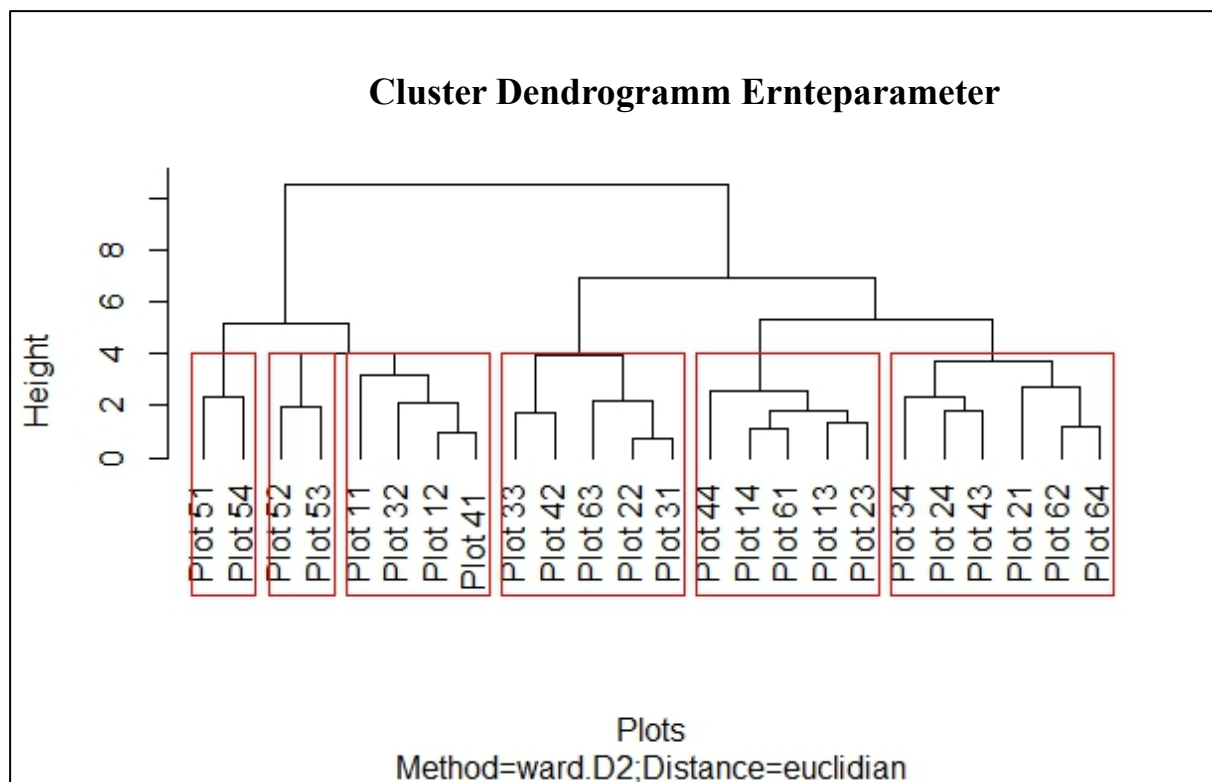
Plot	N _t	C _t	C/N	C _{org}	K _{DL}	P _{DL}	Mg _{CaCl2}	pH-Wert
	[%]			[%]	[mg 100g ⁻¹]			
11	0,13	1,51	11,27	1,29	8,87	34,34	6,19	5,30
12	0,12	1,32	11,46	1,14	10,01	32,88	5,63	5,39
13	0,12	1,37	11,17	1,16	9,98	31,44	6,06	5,52
14	0,12	1,32	11,39	1,14	14,02	30,78	6,41	5,61
21	0,13	1,50	11,83	1,31	10,03	35,69	6,38	5,81
22	0,12	1,42	11,69	1,25	9,93	32,80	6,28	6,07
23	0,11	1,29	11,22	1,09	8,39	32,13	5,88	6,17
24	0,11	1,26	11,11	1,08	7,97	32,86	6,06	5,95
31	0,12	1,39	11,59	1,14	8,91	37,39	5,77	6,05
32	0,12	1,35	11,70	1,15	9,06	32,66	5,40	6,12
33	0,11	1,27	11,34	1,07	8,31	32,24	5,87	6,07
34	0,11	1,39	12,06	1,15	9,71	34,42	5,64	6,79
41	0,12	1,37	11,66	1,22	7,19	34,96	5,77	6,57
42	0,12	1,38	11,61	1,18	8,32	34,08	6,10	6,25
43	0,11	1,25	11,62	1,02	6,66	30,11	5,61	6,35
44	0,11	1,27	11,50	1,11	6,80	30,51	6,12	6,28
51	0,12	1,37	11,46	1,13	8,75	37,34	6,74	6,15
52	0,11	1,34	11,87	1,09	7,31	30,80	5,30	6,19
53	0,12	1,47	12,05	1,22	9,02	35,71	6,27	6,12
54	0,12	1,33	11,30	1,11	9,89	26,52	5,20	5,99
61	0,12	1,36	11,59	1,15	8,88	34,22	6,42	6,02
62	0,13	1,52	12,03	1,24	8,68	31,75	7,24	6,05
63	0,12	1,30	11,22	1,09	10,69	34,23	6,44	5,97
64	0,11	1,29	11,85	1,06	8,05	34,68	6,19	6,19
Variante [M.-%] MW								
Pellets 2014	0,12	1,38	11,32	1,18	10,72	32,36	6,07	5,46
Treber 2014	0,12	1,37	11,46	1,18	9,08	33,37	6,15	6,00
Wolle 0,1 2014	0,12	1,35	11,68	1,13	9,00	34,18	5,67	6,26
Wolle 0,2 2015	0,11	1,32	11,60	1,13	7,24	32,42	5,90	6,36
Wolle 01, 2015	0,12	1,38	11,67	1,14	8,74	32,59	5,88	6,11
Kontrolle	0,12	1,37	11,67	1,13	9,07	33,72	6,57	6,06
Variante [M.-%] SD								
Pellets 2014	0,01	0,08	0,11	0,06	1,96	1,37	0,28	0,12
Treber 2014	0,00	0,07	0,24	0,07	0,73	2,10	0,19	0,08
Wolle 0,1 2014	0,00	0,05	0,26	0,03	0,50	2,03	0,18	0,31
Wolle 0,2 2015	0,00	0,06	0,06	0,07	0,65	2,13	0,22	0,13
Wolle 01, 2015	0,00	0,06	0,30	0,05	0,93	4,25	0,65	0,07
Kontrolle	0,01	0,09	0,30	0,07	0,98	1,15	0,40	0,08



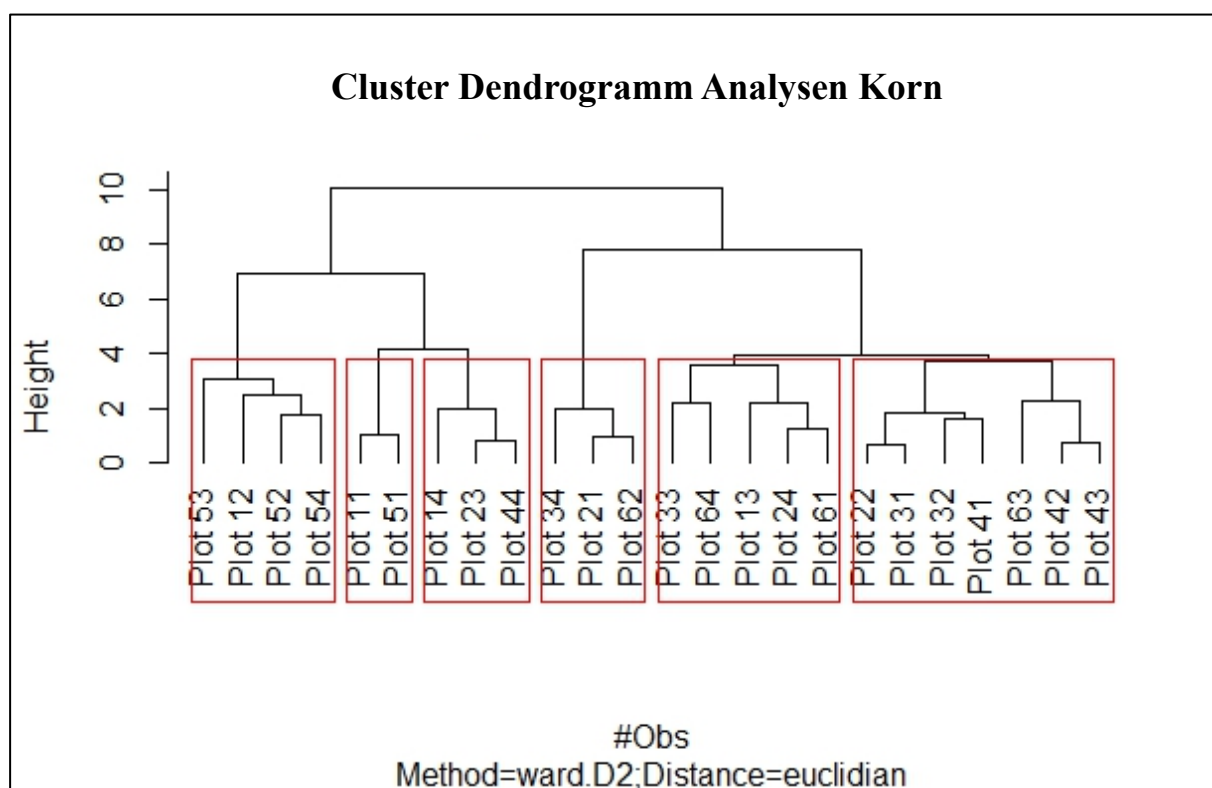
A 18: VP 2 Winterweizen 2015 ermittelte MW der C/N-Verhältnisse des Bodens der Plots über die Tiefe; n=8 (Probennahme 3 Tage nach der Ernte)

Tab. A 17: VP 2 Winterweizen 2015 Eingangsparameter Clusteranalysen

Ernte	Chemische Parameter Korn	Bodenchemie
Ertrag [dt ha ⁻¹]	Rp	C/N
FM [kg]	TM	C _{org}
TKG [g]	C/N	K _{DL}
Länge [cm]	Ca	P _{DL}
SPAD	K	Mg _{CaCl2}
	Mg	pH-Wert
	P	



A 19: VP 2 Winterweizen 2015 Dendrogramm der Ernteparameter



A 20: VP 2 Winterweizen 2015 Dendrogramm der chemischen Analyse Korn

Danksagung

Mein Dank geht an Frau Prof. Dr. Jutta Zeitz und PD Dr. Heide Hoffmann für die Überlassung des Themas. Frau Prof. Dr. Jutta Zeitz möchte ich an dieser Stelle besonders für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes im Fachgebiet der Bodenkunde sowie für die stete Bereitschaft, Unterstützung und Betreuung in jeglicher Phase der Erstellung der Arbeit danken. Für die Übernahme der gutachterlichen Tätigkeit möchte ich zudem Herrn Dr. Gernot Verch und Herrn Prof. Dr. Oswald Blumenstein danken.

Herrn Jörg Schmidt und Mitarbeiterinnen möchte ich ebenfalls einen besonderen Dank für die Bereitschaft und Unterstützung, fachlichen Ratschläge und kritischen Hinweise bei der Feldarbeit aussprechen. Herrn Dr. Klaus-Peter Götz und Frau Maxie Grüter möchte ich ebenfalls ausdrücklich insbesondere für die Unterstützung zu Beginn der Arbeiten danken und dass ich immer ein offenes Ohr für jegliche Art fachlicher Probleme vorgefunden habe. Frau Sarah Dilling, Frau Meike Stark, Frau Franziska Prade und Frau Kathleen Karges gelten mein Dank für die stete Unterstützung während der Feldarbeiten sowie die fachliche Unterstützung durch Auswertungen großer Datenmengen im Rahmen einer Bachelorarbeit bzw. von Studienprojekten.

Zudem ein großes Dankeschön an alle Mitglieder der Fachgruppe Bodenkunde. Ohne die tatkräftige Unterstützung sowohl im geistigen Austausch als auch durch körperliche Arbeit auf dem Feld wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Auch dem Team des Gemeinschaftslabors Analytik am Albrecht Daniel Thaer-Institut der Lebenswissenschaftlichen Fakultät möchte ich meinen Dank für die Unterstützung während der Laborarbeiten aussprechen. Insbesondere sei an dieser Stelle Frau Ines Dutschke erwähnt.

Meinen lieben Freunden Janine Vierheller, Frank Pustlauck, Marcus Straka und Antje Knorr danke ich für die große seelische und auch fachliche Unterstützung während der Erstellung der Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt **Sebastian Thiede und meiner lieben Mutter**, die mich stets begleitet und mit Ratschlägen, Diskussionen und Korrekturarbeiten in besonderem Maße unterstützt haben.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die gegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Arbeit nur in diesem Promotionsverfahren eingereicht habe und dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

Kathleen Garz